

# Bruchkriterien für die Verbindung Stahl-Klebstoff unter statischer und dynamischer Belastung

Prof.-Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. Ch. Hankers

September 1994

Abschlußbericht

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (Az.: Ro 288/29-1)

Kennwort: Bruchkriterium Klebverbundsystem

## INHALT

### Bezeichnungen

1. Aufgabenstellung
2. Inhaltliche Übersicht
3. Zum Einfluß von Fugen auf die Tragfähigkeit eines Bauteiles
  - 3.1 Allgemein
  - 3.2 Festigkeitshypothese für Fugen
  - 3.3 Tragfähigkeit eines fugenbehafteten Bauteiles
4. Klebverbindungen unter statischer Beanspruchung
  - 4.1 Stahl-Stahl-Klebung
  - 4.2 Kleben von Stahl mit Beton
  - 4.3 Beton-Beton-Klebung
5. Versuche zum Tragverhalten der Klebefuge unter statischer Beanspruchung
  - 5.1 Allgemein
  - 5.2 Versuchskörper und Herstellung
  - 5.3 Kennwerte der verwendeten Klebstoffe
  - 5.4 Meßsystem
  - 5.5 Versuchsaufbau
  - 5.6 Versuchsprogramm
  - 5.7 Versuchsdurchführung
  - 5.8 Versuchsergebnisse
    - 5.8.1 Blindproben
    - 5.8.2 Statische Versuche
      - 5.8.2.1 Fugenneigungswinkel 0°
      - 5.8.2.2 Fugenneigungswinkel 15°
      - 5.8.2.3 Fugenneigungswinkel 30°
      - 5.8.2.4 Fugenneigungswinkel 60°
  - 5.9 Bruchkriterium für statische Beanspruchung
    - 5.9.1 Spannungszustand in der Klebefuge
    - 5.9.2 Bruchkriterium
    - 5.9.3 Einfluß der Normalspannung  $\sigma_{\perp}$  in Fugenlängsrichtung
6. Klebverbindungen unter dynamischer Beanspruchung
  - 6.1 Allgemein
  - 6.2 Stahl-Stahl-Klebung

- 6.3 Stahl-Beton-Klebung
- 6.4 Beton-Beton-Klebung
- 7. Versuche zum Tragverhalten der Klebefuge unter dynamischer Beanspruchung
  - 7.1 Versuchsbeschreibung
  - 7.2 Versuchsauswertung
    - 7.2.1 Darstellung der erreichten Lastspielzahlen im Wöhler-Diagramm
    - 7.2.2 Einfluß einer Druckbeanspruchung
    - 7.2.3 Einfluß der Klebstoffart
  - 7.3 Erweiterung des Bruchkriteriums auf dynamische Beanspruchung
- 8. Schädigungsprozeß unter dynamischer Beanspruchung
  - 8.1 Verformung in Abhängigkeit von Belastung und Lastspielzahl
  - 8.2 Bruchmechanisches Konzept
    - 8.2.1 Allgemein
    - 8.2.2 Rißöffnungsmoden
    - 8.2.3 Experimentelle Bestimmung der Bruchzähigkeit unter statischer Beanspruchung
    - 8.2.4 Bestimmung des Rißfortschrittes unter dynamischer Beanspruchung
    - 8.2.5 Auswertung
    - 8.2.6 Offene Probleme
- 9. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen
- 10. Literatur

## Anhang

## BEZEICHNUNGEN

(Weitere Zeichen werden im Text erklärt)

### Allgemein

|     |               |
|-----|---------------|
| cal | rechnerisch   |
| exp | experimentell |
| max | maximal       |
| min | minimal       |

### Geometrische Größen

|          |  |
|----------|--|
| b        | Breite   |
| h        | Höhe   |
| w        | Länge der Klebefuge                                |
| $\alpha$ | Neigungswinkel der Klebefuge gegen die Horizontale |

### Indizes

|   |              |
|---|--------------|
| g | Klebstoff    |
| s | Stahl        |
| c | Beton        |
| u | Bruchzustand |
| m | Mittelwert   |

### Kräfte, Momente, Spannungen, Steifigkeitswerte

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| F                              | Kraft (Zug positiv)                        |
| $F^0, F^u$                     | Oberlast, Unterlast im dynamischen Versuch |
| $\sigma$                       | Normalspannung allgemein                   |
| $\sigma_0$                     | äußere Normalspannung                      |
| $\sigma_n$                     | Spannung normal zur Klebefuge              |
| $\sigma_l$                     | Spannung parallel zu Klebefuge             |
| $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ | Hauptspannungen                            |
| $\tau$                         | Schubspannung                              |
| E                              | Elastizitätsmodul                          |
| $\Delta\sigma$                 | Schwingbreite $\sigma^0 - \sigma^u$        |

### **Kennwerte für Baustoffe**

|          |                          |
|----------|--------------------------|
| $f_c$    | Betondruckfestigkeit     |
| $f_{ct}$ | Betonzugfestigkeit       |
| $f_{gc}$ | Klebstoffdruckfestigkeit |
| $f_{gt}$ | Klebstoffzugfestigkeit   |

### **Verformungen**

|     |                                    |
|-----|------------------------------------|
| $v$ | Verformung senkrecht zur Klebefuge |
| $s$ | Verschiebung in Klebefugenebene    |

### **Bruchmechanische Größen**

|       |                                       |
|-------|---------------------------------------|
| $k$   | Spannungsintensitätsfaktor            |
| $k_c$ | kritischer Spannungsintensitätsfaktor |
| $a$   | Rißlänge                              |
| $a_c$ | kritische Rißlänge                    |
| $a_0$ | Ausgangsrißlänge                      |
| $G$   | Rißerweiterungskraft                  |
| $C$   | Nachgiebigkeit (compliance)           |

### **Weitere Zeichen**

|           |                         |
|-----------|-------------------------|
| $\beta_s$ | Adhäsionsanteil         |
| $\mu$     | Reibbeiwert             |
| $\nu$     | Querdehnzahl            |
| $N$       | Lastspielzahl           |
| $p$       | Bruchwahrscheinlichkeit |

## 1. AUFGABENSTELLUNG

Eine Möglichkeit zur Biegeverstärkung von Stahl- oder Spannbetonbauteilen ist das Kleben von Laschen aus Stahl oder Faserverbundwerkstoffen in der Zugzone auf den Beton. Dieses weltweit angewandte Verfahren dient zur Querschnittsergänzung der Innenbewehrung. Eine Mitwirkung der Lasche an der Lastabtragung findet nur bei intaktem Verbund zwischen Lasche und Beton statt. Das Verbundsystem Lasche - Klebstoff - Beton wird planmäßig durch Zugspannungen in Laschenlängsrichtung, sowie durch Verbundspannungen und Normalspannungen normal zu dieser in den Krafteinleitungsbereichen beansprucht.

Die verwendeten Klebstoffe besitzen eine Kohäsionsfestigkeit, die die Betonzugfestigkeit um ein Vielfaches überschreitet. Im statischen Bruchversuch tritt das Versagen i.d.R. durch Verbundbruch im Klebschichtnahen Beton auf. Bei dynamischer Belastung wurde dagegen vereinzelt ein progressiver Klebverbundbruch beobachtet, bei dem die Bruchfläche vornehmlich an der Grenzfläche Lasche-Klebstoff, aber innerhalb des Klebstoffes, verläuft. Da zunehmend Bauteile unter planmäßig nicht vorwiegend ruhender Beanspruchung verstärkt werden, besteht ein zunehmender Bedarf zur Klärung dieser Probleme. Ein Klebverbundbruch an Stelle des Betonversagens trat ebenfalls bei normal zur Laschenebene vorgespannten Stahllaschen unter statischer Beanspruchung auf. Bruchursache und Bruchmechanismus sind bislang unerforscht.

Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der Tragfähigkeit des Klebstoffes unter statischer und dynamischer Beanspruchung. An Versuchskörpern mit definierten Beanspruchungszuständen sollen der Bruchmechanismus erforscht und Bruchkriterien des Klebschichtversagens für statische und dynamische Beanspruchung entwickelt werden.

Das Ergebnis dieser Arbeit stellt einen Baustein zu einem Bemessungsmodell für laschenverstärkte Betonbauteile dar.

## 2. INHALTLICHE ÜBERSICHT

Zunächst wird in Kapt. 3 der mögliche Einfluß von Fugen auf die Tragfähigkeit eines Bauteiles angegeben, und es werden Festigkeits-hypothesen für Fugen genannt.

Kapt. 4 enthält eine kurze Literaturübersicht über Klebverbindungen unter statischer Beanspruchung. Differenziert wird nach Stahl-Stahl, Stahl-Beton und Beton-Beton-Verklebungen. Weiterführende Literatur wird genannt.

In Kapt. 5 erfolgt die Beschreibung der Versuche an miteinander verklebten prismatischen Versuchskörperhälften unter statischer Beanspruchung. Es werden die Versuchsergebnisse ausgewertet und Bruchkriterien als Grundlage für eine Bemessungsmodell angegeben.

Das Kapt. 6 zeigt den Einfluß einer dynamischen Beanspruchung auf die Tragfähigkeit einer verklebten Verbindung auf. In Kapt. 7 erfolgt auf Basis der durchgeführten Versuche die Erweiterung des Bruchkriteriums auf dynamische Beanspruchung.

Mit Hilfe der linear-elastischen Bruchmechanik wird in Kapt. 8 der Schädigungsprozeß beschrieben. Grenzwerte der Bruchzähigkeit werden angegeben.

### **3. ZUM EINFLUß VON FUGEN AUF DIE TRAGFÄHIGKEIT EINES BAUTEILES**

#### **3.1 Allgemein**

In Abhängigkeit von der Art der Versagensursache lassen sich verschiedene Festigkeitshypothesen formulieren. Kriterium kann das Überschreiten eines Grenzwertes der Trag- oder Verformungsfähigkeit, wie z.B. des Maximalwertes der Spannung, der Dehnung oder der Formänderungs-, bzw. der Gestaltänderungsenergie sein. Das Versagen tritt dabei in der Ebene des entsprechenden kritischen Zustandes auf.

Die verwendeten Materialien Klebstoff, Stahl und Beton werden im folgenden als homogene, isotrope Kontinua mit richtungsunabhängigem Bruchverhalten betrachtet. Ein allgemeiner Spannungszustand bewirkt unter dieser Voraussetzung dieselbe Werkstoffanstrengung wie jener, der durch Transformation in die Hauptspannungsrichtungen entstanden ist.

Im folgenden sollen kurz die bekannten Beziehungen für die Transformation eines allgemeinen Spannungszustandes in die Hauptspannungsrichtungen sowie eine Möglichkeit der grafischen Darstellung angegeben werden.

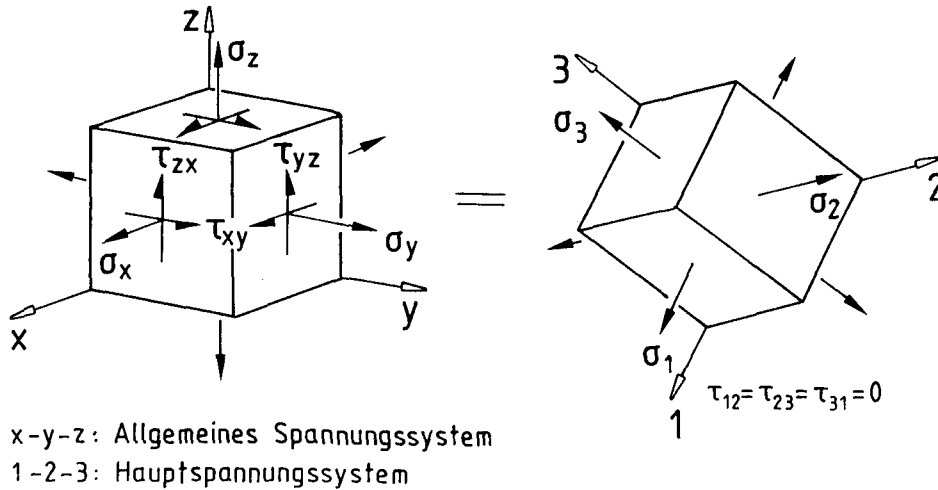


Bild 3.1: Allgemeiner räumlicher Spannungszustand

Ein allgemeiner räumlicher Spannungszustand im x,y,z-Koordinatensystem ist nach Bild 3.1 durch den Spannungsvektor mit den Komponenten

$$S = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{yx} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{zy} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (3.1)$$

definiert.

Eine Transformation in die Hauptspannungsrichtungen führt zur Lösung der kubischen Gleichung

$$\sigma^3 - I_1\sigma^2 + I_2\sigma - I_3 = 0 \quad (3.2)$$

Die Koeffizienten (Invarianten) haben die Bedeutung:

$$\begin{aligned} I_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ I_2 &= \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \\ I_3 &= \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - (\sigma_x\tau_{yz}^2 + \sigma_y\tau_{zx}^2 + \sigma_z\tau_{xy}^2) \end{aligned} \quad (3.3a-c)$$

Die Wurzeln dieser kubischen Gleichung sind die Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Diese sind unabhängig vom gewählten Koordinatensystem.

Zur Vereinfachung wird im folgenden ein zweiachsiger Spannungszustand nach Bild 3.2 betrachtet. Die Spannungen an einem im beliebigen Winkel  $\alpha$  geneigten Flächenelement lassen sich aus einfachen Gleichgewichtsbetrachtungen zu



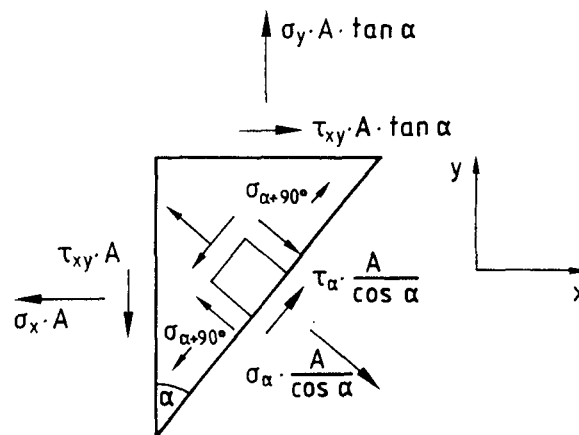


Bild 3.2: Zweiachsiger Spannungszustand

$$\sigma_{\alpha} = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) + 0,5(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha + \tau_{xy}\sin 2\alpha \quad (3.4)$$

$$\tau_{\alpha} = 0,5(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\alpha - \tau_{xy}\cos 2\alpha \quad (3.5)$$

$$\sigma_{\alpha+90^{\circ}} = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) - 0,5(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\alpha - \tau_{xy}\sin 2\alpha \quad (3.6)$$

angeben. Eine anschauliche Darstellung ergibt sich bei Umformung der Gl.(3.4) und (3.5) zu

$$[\sigma_{\alpha} - 0,5(\sigma_x + \sigma_y)]^2 + \tau_{\alpha}^2 = 0,25[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \tau^2] \quad (3.7)$$

Gl. (3.7) stellt eine Kreisgleichung im x-y- Koordinatensystem dar:

$$[x - x_0]^2 + y^2 = R^2 \quad (3.8)$$

mit

$$[x - x_0]^2 = [\sigma_{\alpha} - 0,5(\sigma_x + \sigma_y)]^2$$

$$y^2 = \tau_{\alpha}^2$$

$$R^2 = 0,25[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4 \tau^2]$$

Gl.(3.7) läßt sich in anschaulicher Weise im sogenannten Mohr'schen Spannungskreis darstellen. Bild 3.3 zeigt exemplarisch eine derartige Darstellung. Für den Spannungszustand  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\tau_{xy}$  lassen sich die Spannung  $\sigma_{\alpha}$  normal zur, bzw.  $\tau_{\alpha}$  in der unter dem Winkel  $\alpha$  geneigten Ebene nach Gl. (3.4) und (3.5) bestimmen. Normal zur Spannung  $\sigma_{\alpha}$  wirkt die Spannungskomponente  $\sigma_{\alpha+90^{\circ}}$  als Längsspannung parallel zur Fugenrichtung, s. Gl. (3.6). Den Schnittpunkt des Spannungskreises mit der Abzisse bilden die beiden Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ , die sich definitionsgemäß für  $\tau_{\alpha} = 0$  zu

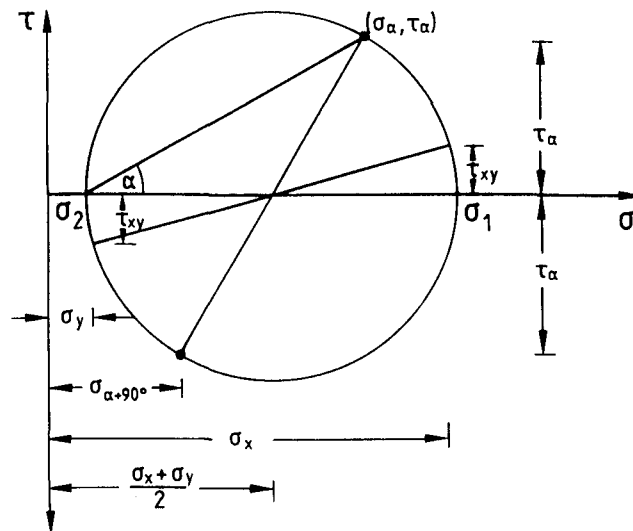


Bild 3.3: Mohr'scher Spannungskreis in schematischer Darstellung

$$\sigma_{1,2} = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) \pm 0,5\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \quad (3.9)$$

ergeben.

Ein dreiachsiger Spannungszustand würde durch drei Spannungskreise wiedergegeben, die sich paarweise berühren.

Mit Hilfe des Mohr'schen Spannungskreises lassen sich Beanspruchungszustände darstellen und mit Grenztragfähigkeiten vergleichen. Die mittlere Hauptspannung  $\sigma_2$  kann hierbei nicht berücksichtigt werden. Für weitergehende grundlegende Betrachtungen wird auf die umfangreiche Literatur, z.B. /1/, /2/ und /3/ verwiesen.

Wird der jeweils herrschende Spannungszustand mit Hilfe der Mohr'schen Spannungskreise beschrieben, so kann eine mögliche Bruchbedingung als Hüllkurve aller ertragbaren Spannungszustände aufgefaßt werden. Die Hüllkurve ist eine Funktion  $\tau = f(\sigma)$  für die sich je nach Wahl unterschiedliche Grenzflächen ergeben. Berührt ein Spannungskreis die Hüllkurve, so tritt Bruch in der Ebene des entsprechenden Spannungszustandes auf. Bild 3.4 zeigt exemplarisch eine parabolische Hüllkurve, definiert durch die Werte der einachsigen Druck-, bzw. Zugfestigkeit. Ein Spannungszustand  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  berührt mit seinem zugehörigen Spannungskreis die Hüllkurve im Punkt  $(\sigma_\alpha, \tau_\alpha)$ . Das Versagen tritt in der unter dem Winkel  $\alpha$  zur  $\sigma_3$ -Richtung geneigten Ebene unter dem lokalen Spannungszustand  $\sigma_\alpha, \tau_\alpha, \sigma_{\alpha+90^\circ}$  auf.

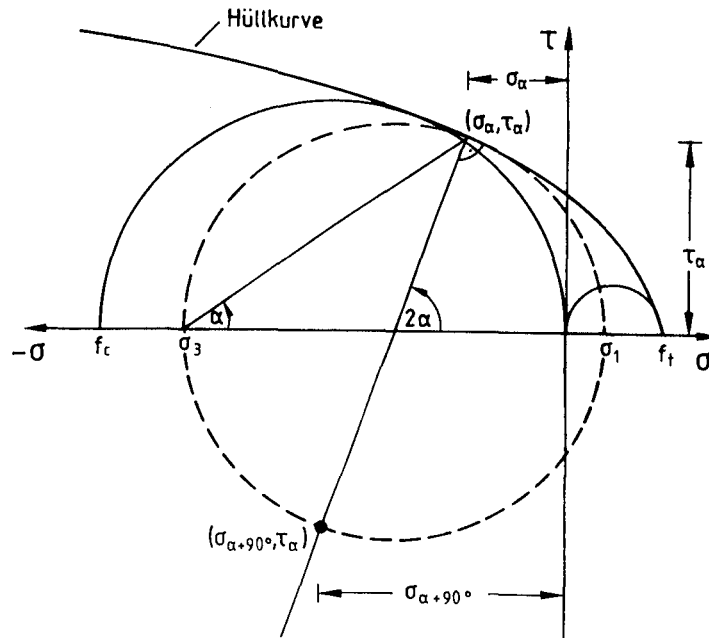


Bild 3.4: Parabolische Hüllkurve als Einhüllende

### 3.2 Festigkeitshypothese für Fugen

Eine Klebefuge setzt sich aus zwei Fügepartnern, zwei Grenzflächen und dem Fugenfüllstoff zusammen, s. Bild 3.5. Das Versagen einer Klebeverbindung kann durch Kohäsionsversagen der Fügepartner bzw. des Fugenfüllstoffes, oder durch Adhäsionsversagen an den Grenzflächen auftreten.

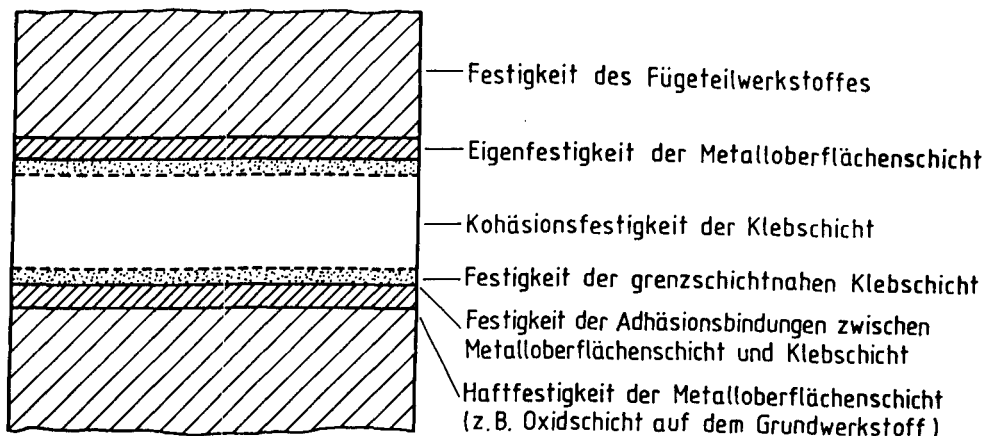


Bild 3.5: Festigkeitsbereiche einer Klebefuge, nach /4/

Die folgenden Betrachtungen setzen eine willkürliche Fugenrichtung voraus und damit eine beliebige Orientierung der Fuge zur Hauptspannungsrichtung. Der Bruch tritt in der unter dem jeweiligen Spannungszustand schwächsten Zone auf. Zu jeder Versagensmöglichkeit können Festigkeitshypothesen

aufgestellt werden. Differenziert werden muß nach der Versagensart.

Eine übliche Formulierung zur Beschreibung der Tragfähigkeit einer Grenzfläche kann in Anlehnung an das Coulombsche Bruchkriterium durch

$$\tau_u = \beta_s + \mu \cdot \sigma_n \quad (3.10)$$

erfolgen, mit dem Adhäsionsanteil  $\beta_s$  und dem normalspannungsabhängigem Reibungsanteil  $\mu \cdot \sigma_n$ . Die Tragfähigkeit wird nur von den beiden fugenbezogenen Spannungskomponenten  $\tau$  und  $\sigma_n$  bestimmt. Eine Normalspannung in Fugenlängsrichtung bleibt ohne Einfluß.

Im Gegensatz hierzu kann das Kohäsionsversagen in einem Klebstoff wie das Bruchgeschehen in einem isotropen Stoff behandelt werden. Für gefüllte Epoxidharzklebstoffe sind verschiedene Bruchkriterien gebräuchlich. Anwendung finden z.B. die Festigkeitshypothese der maximalen Normalspannung, die Mohr-Coulombsche Bruchbedingung oder das Bruchkriterium der maximalen Oktaeder-Schubspannung. Sie werden z.B. in /7/, /8/ diskutiert. Ein mehrachsiger Spannungszustand in der Klebefuge infolge Querdehnungsbehinderung durch starre Fügeteile im Vergleich zum Klebstoff und eine damit verbundene Abhängigkeit der Festigkeit von der Klebschichtdicke muß dabei berücksichtigt werden. Auf diesen Aspekt wird bei der Auswertung der eigenen Versuche in Kapt. 6 näher eingegangen.

### 3.3 Tragfähigkeit eines fugenbehafteten Bauteiles

Im folgenden interessiert die Frage, wann eine Fuge für die Tragfähigkeit eines Bauteiles maßgebend werden kann. Die Bedingung für ein Fugenversagen ist dann gegeben, wenn es für einen beliebigen lokalen Spannungszustand zu einem Unterschreiten der Festigkeit der Fügeteile durch die Tragfähigkeit der Fuge kommt. Die Schnittpunkte der Grenzlinien der ertragbaren Spannungen für die Fuge und derjenigen für das Fügeteil grenzen den Bereich des möglichen Fugenversagens ein.

Betrachtet wird ein prismatischer Körper nach Bild 3.6 unter einachsiger äußerer Beanspruchung mit einer Fuge unter einem beliebigen Fugenneigungswinkel  $\alpha$ . Die äußere Belastung  $\sigma_0$  wird in Spannungen in und normal zur Fugenebene nach Gl.(3.4) bis (3.6) zerlegt. Aus Gl.(3.4) bis (3.6) folgt für  $\sigma_x = 0$ :

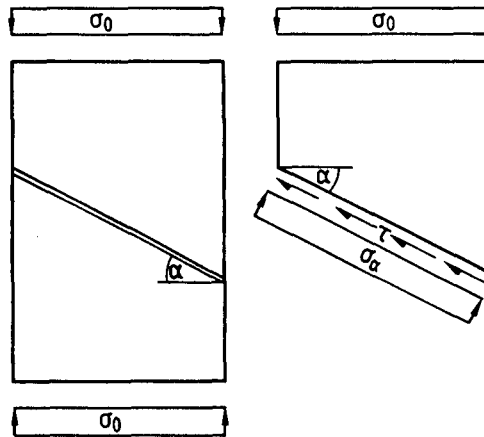


Bild 3.6: Fugebehafteter prismatischer Körper

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_0 \cos^2 \alpha \quad (3.11)$$

$$\tau = \sigma_0 \sin \alpha \cos \alpha \quad (3.12)$$

$$\sigma_{\alpha+90^\circ} = \sigma_0 \sin^2 \alpha \quad (3.13)$$

Wird als Festigkeitskriterium für die Fuge, die Gl. (3.10), also Grenzflächenversagen, angenommen, lassen sich bei Kenntnis der Tragfähigkeit der Fügeteile diejenigen Fugenneigungswinkel  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  angeben, zwischen denen die Fuge für die Tragfähigkeit des Gesamtkörpers maßgebend werden kann, s. Bild 3.7. Folgende Beziehung zwischen dem Fugen-

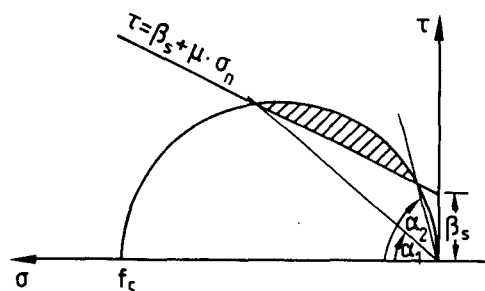


Bild 3.7: Einfluß einer Fuge auf die Tragfähigkeit eines Körpers

neigungswinkel  $\alpha$  und der einachsigen äußeren Beanspruchung  $\sigma_0$  läßt sich nach Einsetzen von Gl.(3.11) und (3.12) in Gl.(3.10) angeben:

$$\sigma_0 = \beta_s \frac{(1 + \tan^2 \alpha)}{(\tan \alpha - \mu)} \quad (3.14)$$

Bild 3.8 zeigt den Funktionsverlauf von  $\sigma_0$  für Fugenneigungswinkel  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ . Diese Funktion besitzt Asymptoten bei  $\alpha_1^* = \arctan \mu$  bzw.  $\alpha_2^* = 90^\circ$ . Die Schnittpunkte mit der  $f_c$ -Linie als Größe für die Grenztragfähigkeit der Fügeteile ergeben sich zu

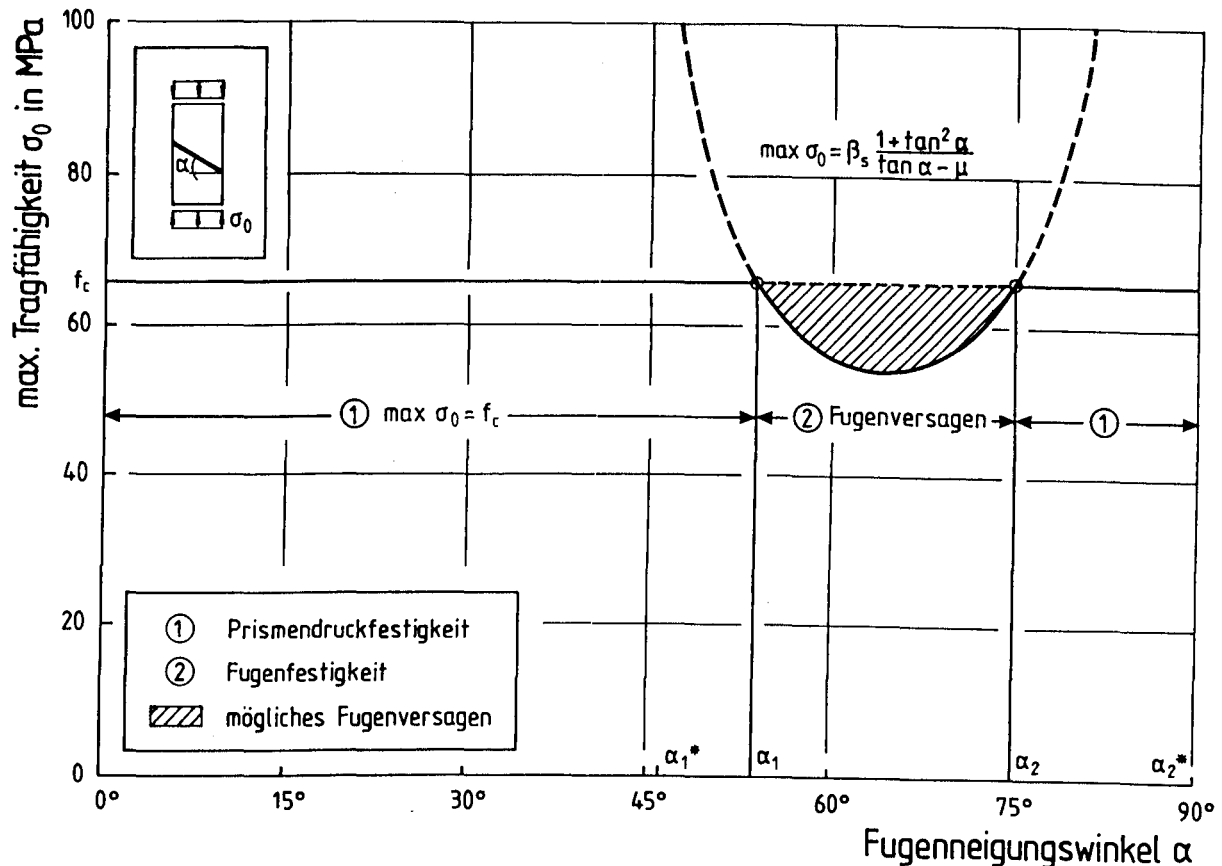


Bild 3.8: Einfluß des Fugenneigungswinkel  $\alpha$  auf die Tragfähigkeit eines fugenbehafteten Körpers unter einachsiger Druckbeanspruchung

$$\alpha_{1,2} = \arctan \left[ 0,5 \frac{f_c}{\beta_s} \pm \sqrt{\left( 0,5 \frac{f_c}{\beta_s} \right)^2 - \left( \frac{f_c}{\beta_s} \mu + 1 \right)} \right] \quad (3.15)$$

Mit den Beziehungen (3.14) und (3.15) lassen sich der Einfluß einer beliebig orientierten Fuge auf die Festigkeit eines einachsig beanspruchten Körpers unter Druckbeanspruchung angeben. Eine praktische Anwendung dieses Kriteriums erfolgte bei der Segmentbauweise. Dabei werden Betonfertigteile miteinander verklebt und wirken somit als monolithisches Bauteil, z.B. als Biegebalken. Hier sind die Fugen i.d.R. vertikal orientiert, so daß es bei üblichen Druckstrebenneigungen zu kleinen Winkeln zwischen der Druckstrebe

und der Klebefläche der Fuge kommt. Nach Bild 3.8 übt die Fuge dann bei ordnungsgemäßer Ausführung keinen Einfluß auf die Festigkeit des Gesamtbauteiles aus.

Anders sind jedoch die Verhältnisse beim Verstärken von Biegebauteilen durch die Methode der geklebten Bewehrung. Durch die horizontale Klebefugenanordnung sind die Winkel zwischen Klebefuge und Druckstrebe größer. Bild 3.9 zeigt den Unterschied. Somit kann, im Gegensatz zum Segmentkleben die Klebefuge für die lokale Tragfähigkeit des Bauteiles durchaus maßgebend werden.

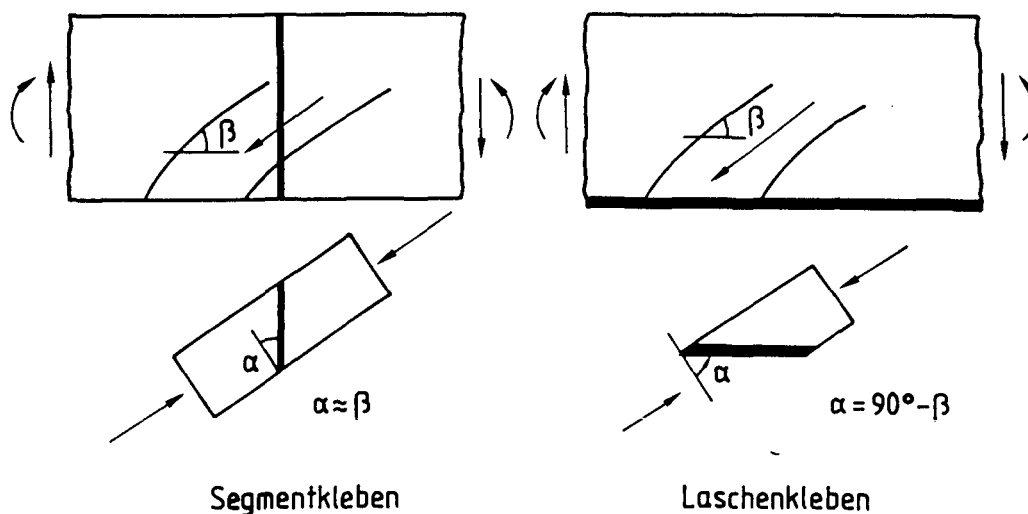


Bild 3.9: Vergleich der Fugenneigungswinkel für das Laschen- und Segmentkleben

#### 4. KLEBVERBINDUNGEN UNTER STATISCHER BEANSPRUCHUNG

Im folgenden soll anhand der Literatur ein kurzer Überblick über die Forschung auf dem Gebiet der geklebten Verbindungen unter statischer Beanspruchung gegeben werden. Neben den Verklebungen von Stahl mit Stahl werden auch Stahl-Beton- und Beton-Beton-Verbindungen betrachtet.

##### 4.1 Stahl-Stahl-Klebung

Auf dem Gebiet des Metallklebens sind umfangreiche Forschungen durchgeführt worden. Zusammenfassende Überblicke vermitteln z.B. die Arbeiten von Hahn /16/ und Habenicht /4/.

Schwerpunkt der Untersuchungen war die Erfassung des Spannungszustandes in

der Klebschicht und in den Fügeteilen. In der Arbeit von Volkersen /13/ wird ein Ansatz zur Schubspannungsverteilung im Fügebereich unter der Annahme elastischen Werkstoffverhaltens angegeben. Dieser Ansatz berücksichtigt die Verformungen normal zur Klebschicht nicht (ebener Spannungszustand). Goland und Reissner /14/ geben ein Verfahren an, mit dem der zweiachsige Spannungszustand unter Berücksichtigung der Schub- und Normalspannungskomponenten beschrieben werden kann. Weitergehende Untersuchungen wurden von Hart-Smith /15/ vorgenommen. Seine Spannungsanalyse basiert auf ideal-elastisch plastischen Klebstoffverhalten unter Berücksichtigung der Fügeteilbiegung. Der Einfluß eines nichtlinearen Kraft-Verformungsverhalten der Klebschicht auf die Schubspannungsverteilung wurde von Althof /17/ untersucht. Mittels eines iterativen Rechenverfahrens konnten unter Vernachlässigung der Normalspannungen normal zur Klebschicht die Gleitungen in einer einschnittigen Überlappung ermittelt werden. Die Übereinstimmung von Theorie und Versuch ist gut. Neben diesem iterativen Verfahren und den zuvor genannten geschlossenen Lösungen existieren auch Ergebnisse von FE-Rechnungen, mit denen der dreidimensionale Spannungszustand in der Klebschicht und im Fügeteil angegeben werden kann.

Zur Beschreibung der Grenztragfähigkeit geklebter Verbindungen existieren je nach Art des verwendeten Klebstoffes unterschiedliche Bruchhypothesen. Eine Bewertung der verschiedenen Ansätze wurde z.B. von Schneider und Bardenheier in /7/ vorgenommen. Müller /18/ und Cornelius /19/ verwendeten die Hypothese der größten Hauptzugspannung, die aus einem Versuch mit reiner Schubbeanspruchung ermittelt wird. Engasser und Puck /8/ untersuchen den Beanspruchungszustand in dünnwandigen geklebten Hohlproben unter Torsion- und Zug-, bzw. und Druckbeanspruchung. Auf Grundlage der Versagenshypothese auf Basis der Oktaeder-Schubspannung nach /7/, basierend auf Tschoegl /20/, wurde ein Bruchkriterium entwickelt, das den Wechsel der Versagensart vom Kohäsions- zum Adhäsionsversagen bei abnehmender Schubbeanspruchung beinhaltet. Schlimmer /21/ formuliert aus dem Spannungszustand die Vergleichsschubspannung und stellt diese einer Bruchschubspannung gegenüber.

Viele der dargestellten Bruchhypothesen setzen homogene Werkstoffe und ideale Haftung des Klebstoffes an den Fügeteilen voraus. Die Klebschicht wird somit als isotroper Werkstoff betrachtet. Das Verhalten eines fehlerbehafteten Werkstoffes kann dagegen nur mit Hilfe der Bruchmechanik beschrieben werden. Hier sind grundlegende Arbeiten von Rippling und



Mostovoy /22/ durchgeführt worden. Demnach tritt duktiler Versagen der Klebefuge ein, wenn die Hauptspannung in der Klebefuge die Fließgrenze des Klebstoffes überschreitet. Sprödes Versagen tritt dagegen auf, wenn der vorhandene Spannungsintensitätsfaktor die Bruchzähigkeit des Klebstoffes erreicht.

Für die Dimensionierung in der Praxis werden vereinfacht vielfach Bemessungsgrenzen in Form von Dehnungsbeschränkungen verwendet. Dies setzt voraus, daß sich u.a. die Klebschichtstruktur innerhalb der Klebschichtdicke nicht ändert. Diese Annahme trifft jedoch nicht zu. Von Yi wird in /23/ auf das strukturabhängige Verhalten der Klebschicht im Hinblick auf Festigkeit, Verformung und Alterung eingegangen. Eine starke Abhängigkeit der Festigkeits- und Verformungskennwerte von der Klebschichtdicke wird festgestellt und mit der Klebschichtstruktur begründet. Eine Klebschicht kann demnach vereinfacht als Dreischichtenmodell betrachtet werden. Die Randzonenbereiche in Verbindung mit der Fügeteiloberfläche weisen eine andere Struktur auf, als der Zwischenbereich. Unter dem Rasterelektronenmikroskop ist zu erkennen, daß sich über die Adhäsionszonen in der Werkstoffgrenze zwischen dem Klebstoff und dem Metall hinaus in Richtung zur Klebschichtmitte eine lamellenförmige Strukturierung ausbildet. Diese besitzt eine klebstoffspezifische Länge, die jedoch von der Oberflächenvorbehandlung und den Randbedingungen abhängt. In einem Übergangsbereich wird die Zwischenschicht mit einer globularen Struktur angeschlossen. Da die Eigenfestigkeit der Zwischenschicht geringer ist als die der Randschicht, wird sie i.d.R. festigkeitsbestimmend sein. Zusätzlich bewirkt eine in Fügeteilmähe vorhandene Verformungsbehinderung der Klebschicht festigkeitssteigernd. Von Einfluß ist auch die Klebschichtdicke. Bild 4.1 nach /4/ zeigt die Abhängigkeit der maximalen Schubspannung von der Klebschichtdicke im Zugversuch mit einer einschnittigen Klebverbindung. Ab einer Klebschichtdicke von ca. 0,5 mm übt diese keinen Einfluß mehr auf die Tragfähigkeit der Verbindung aus. Das Versagen tritt dann als Kohäsionsbruch im ungestörten Mittenbereich der Klebschicht auf.

In /23/ wird ein großer Mangel an Werkstoffkennwerten von Klebstoffen festgestellt. Dieser verhindert es, bei Kenntnis der Klebstoffzusammensetzung auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten einer Klebverbindung zu schließen. Bei der Beurteilung von Klebverbindungen sei man immer noch auf experimentelle Untersuchungen angewiesen.

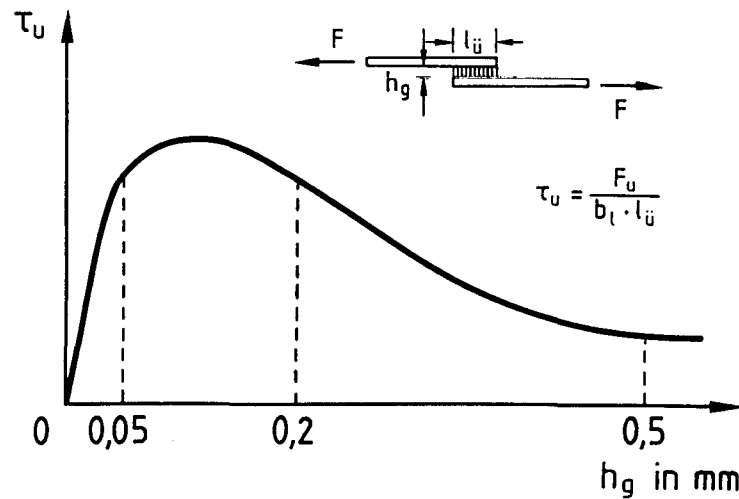


Bild 4.1: Einfluß der Klebschichtdicke auf die Klebfestigkeit, nach /4/

Die Schwerpunkte der zuvor genannten Untersuchungen stammen aus Maschinen- und Flugzeugbau. Für das Bauwesen liegen wenige Informationen für die Anwendung tragender Metallklebverbindungen vor. Von Franke /5/ wird das Tragverhalten der Grenzflächen von Fugen betrachtet. Mit einachsigen Schubdruck- und Schubzugversuchen an prismatischen Versuchskörpern aus Aluminium konnte er nachweisen, daß für das Tragverhalten der Grenzflächen von Fugen lediglich die Kombination aus Normalspannungen normal zur Fuge und Schubspannungen in Fugenrichtung maßgebend sind. Die Normalspannung in

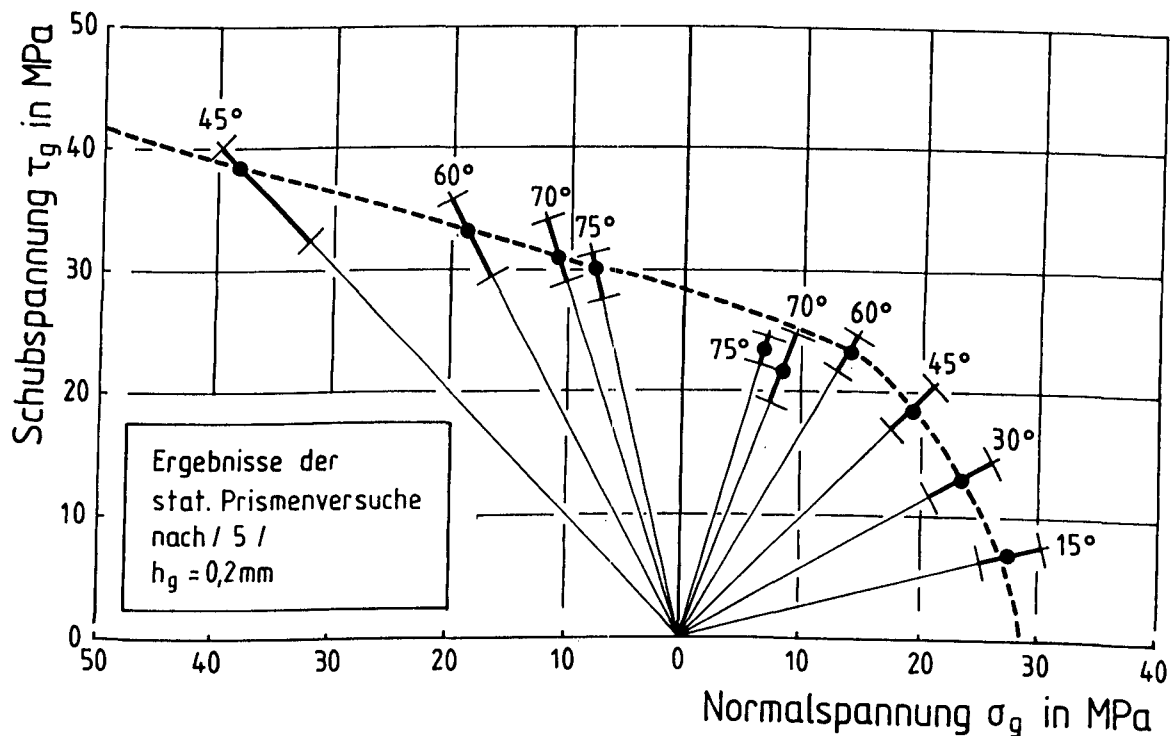


Bild 4.2: Ergebnisse von einachsigen Zug- und Druckversuchen mit dünner Klebefuge, nach /5/

Fugenlängsrichtung, z.B. aus äußerer Belastung oder als Eigenspannung infolge Schwinden oder Temperaturänderung, übt demnach keinen Einfluß auf die Festigkeit aus. Bild 4.2 nach /5/ zeigt die Ergebnisse einachsigen Zug- und Druckversuche mit dünner Klebefuge. Ebenfalls von Franke durchgeführte Torsions-Zug und Torsions-Druck-Versuche bestätigen diese Aussage. Da die Versuche aber nur mit dünnen Klebschichtdicken von 0,2 mm durchgeführt wurden, können diese Aussagen nicht auf baupraktische Schichtdicken von 1 bis ca 5 mm, wie sie bei der Methode der geklebten Bewehrung üblich sind, übertragen werden.

#### **4.2 Kleben von Stahl mit Beton**

Das Verstärken von Stahl- oder Spannbetonkonstruktionen mit geklebten Stahllaschen wird seit Beginn der sechziger Jahre angewendet. Erste Arbeiten entstehen zunächst in Frankreich /26/-/29/, später in Japan /30/, /31/, in der Schweiz /32/-/34/ und in Großbritannien /35/-/38/. Seit 1978 werden am iBMB der TU Braunschweig /39/-/47/ Forschungsarbeiten mit dem Ziel durchgeführt, für das Verbundsystem Stahlbeton-Klebelasche die Einflußgrößen auf die Verbundfestigkeit und auf das Riß- und Verformungsverhalten zu studieren. In /48/ entwickelt Holzenkämpfer eine Theorie zur Lastabtragung in laschenverstärkten Zuggliedern, die auf einem bruchmechanischen Ansatz zur Bestimmung eines Grenzwertes der Verbundlänge basiert. Eine Steigerung der Verbundlänge über diesen Grenzwert hinaus führt zu keiner Erhöhung der Verbundbruchkraft. Über die Anwendung einer angepreßten Endverankerung mit Hilfe vorgespannter Dübel normal zu Laschenrichtung wird in /49/ berichtet. Der Zusammenhang zwischen Relativverschiebung und Verbundspannung wird dabei durch eine Beziehung analog zum FIP Model Code 1990 beschrieben.

#### **4.3 Beton-Beton-Klebung**

Die Anwendung der Beton-Beton-Klebung findet z.B. bei der Segmentbauweise /25/ statt. Bei der Berechnung und Konstruktion derartiger Bauteile ist hervorzuheben, daß eine volle Vorspannung erforderlich ist, um Zugspannungen und ein Aufreißen der Fuge zu vermeiden. Verwendet werden z.B. hochgefüllte Epoxidharzklebstoffe, die in ihrem Verformungsverhalten dem Beton angenähert sind.

Eine umfassende Darstellung über das Kleben im konstruktiven Ingenieurbau ist in /24/ zu finden. Als Versuchskörper werden vornehmlich Beton- oder Zementmörtelprismen mit definierter Fugenneigung unter einachsiger Zug- oder Druckbelastung verwendet. Untersucht wurde neben der statischen Tragfähigkeit auch der Einfluß einer Zeitstand- und Schwellbeanspruchung mit und ohne gleichzeitiger Wassereinwirkung. Zur Beschreibung der Tragfähigkeit wurde ein Bruchkriterium auf Grundlage der Coulomb'schen Reibungsgeraden formuliert, deren Koeffizienten von den Beanspruchungsbedingungen und den Fügeiteiloberflächen abhängen, s. Gl. (3.10). Die Tragfähigkeit der Fuge ist demnach vom herrschenden Hauptspannungszustand unabhängig und hängt von der Oberflächenbeschaffenheit der zu verklebenden Betonoberflächen ab.

## **5. VERSUCHE ZUM TRAGVERHALTEN DER KLEBEFUGE UNTER STATISCHER BEANSPRUCHUNG**

### **5.1 Allgemein**

Mit den nachfolgend beschriebenen eigenen Versuchen sollte versucht werden, weitere Informationen über Versagensart und Schädigungsmechanismus einer epoxidharzverklebten Fuge zu bekommen. Die Grenzzustände der Tragfähigkeit des Klebstoffs wurden mit Versuchskörpern aus Stahl bestimmt, da für alle Beanspruchungsbereiche die Fügeiteilfestigkeit die des Klebstoffes übersteigt sollte.

### **5.2 Versuchskörper und Herstellung**

Zur Erzeugung definierter  $\tau$ - $\sigma_{gn}$ - $\sigma_{gl}$ -Kombinationen wurden prismatische Versuchskörper nach Bild 5.1 verwendet. Hierbei handelt es sich um Vollkörper aus Stahl St 37-2 mit den Abmessungen  $b/d/h = 50/40/200$  mm, die unter dem Winkel  $\alpha$  aufgeschnitten wurden. Seitlich an den Versuchskörperhälften sind Bohrungen angebracht worden, die zur Aufnahme der Meßvorrichtungen dienten. Die Stirnseiten enthielten Gewindebohrungen M 24x1,5 die der Lasteinleitung bei den statischen und dynamischen Zugversuchen dienten. Zur definierten Begrenzung der Klebefläche wurden die Kanten der Fügeiteilflächen mit einer Fase von 2 mm versehen. Die Klebeflächenvorbehandlung entsprach der Stahlvorbehandlung beim Kleben von Laschen auf Beton. Die Schnittfläche wurde entsprechend dem Reinheitsgrad

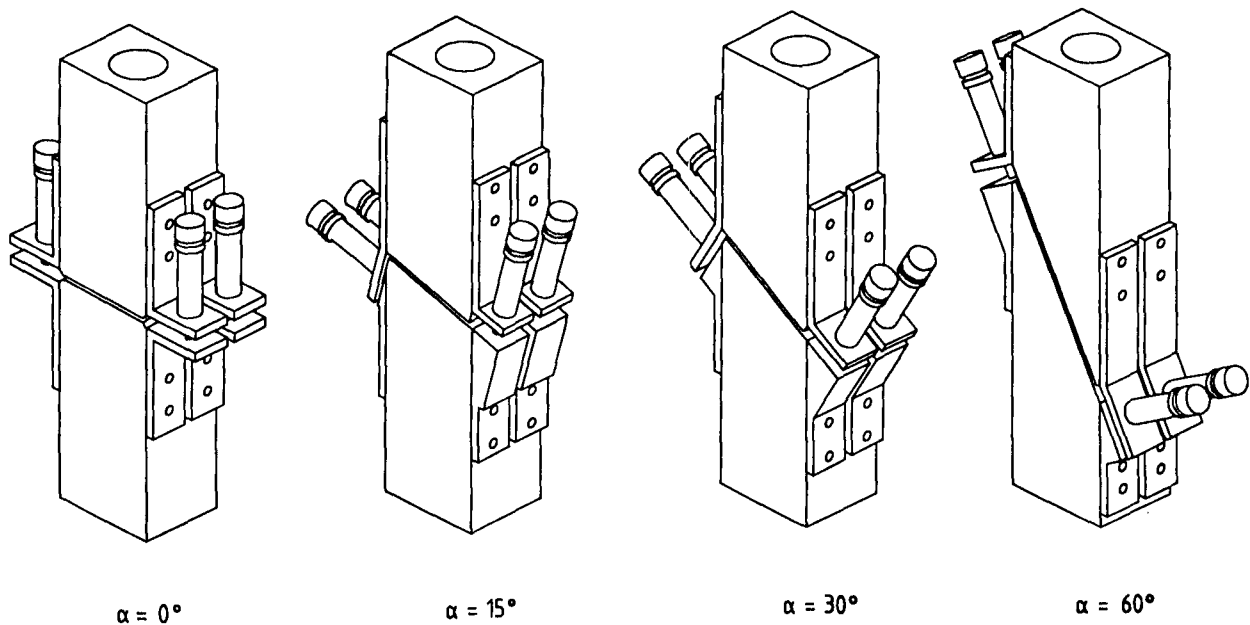


Bild 5.1: Darstellung der Versuchskörper

Sa3 gesandstrahlt und mit Aceton gereinigt. Vor Beginn des Klebevorganges war das Lösungsmittel vollständig verdampft. Anschließend erfolgte das Anmischen des Klebstoffes durch Verrühren der beiden Komponenten gemäß Herstellerangabe. Innerhalb der Verarbeitungszeit wurden die beiden Versuchskörperhälften in einer Schablone liegend miteinander verklebt und bis zur Aushärtung des Klebstoffes erschütterungsfrei gelagert. Um eine definierte Klebschichtdicke von  $h_g=2,0$  mm zu erreichen, wurden zwischen den Haltevorrichtungen für die Wegaufnehmer Distanzstücke eingelegt. Die Klebschichtdicke ist in der Größenordnung, wie sie beim Kleben von Stahlflaschen auf Beton anzutreffen ist.

Durch die Wahl der stählernen Versuchskörper konnte zum einen sichergestellt werden, daß nicht die Fügeteile, sondern ausschließlich die Klebefuge für die Tragfähigkeit maßgebend wurde. Zum anderen wurden durch Wahl der gleichen Stahlgüte und Oberflächenvorbehandlung identische Bedingungen in der Kontaktzone zwischen Klebstoff und Stahl im Vergleich zu den Bedingungen beim Laschenkleben geschaffen. Die Auswirkungen einer Primerung auf die Tragfähigkeit wurde nicht untersucht.

### 5.3 Kennwerte der verwendeten Klebstoffe

Für das Kleben von Stahllaschen auf Beton werden kalthärtende zweikomponentige Epoxidharzklebstoffe verwendet, die zum einen aus dem Basisharz evt. mit Verdünner und zum anderen aus einem Aminhärter bestehen. Zur Verbesserung des Schwindverhaltens wird der Klebstoff mit Quarzsand hochgefüllt. Bei den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verwendeten Klebstoffen handelt es sich um die für das Laschenkleben angewandten Klebstoffe XB5074 der Fa. Ciba Geigy, im folgenden Klebstoff A, bzw. SK41 der Fa. Hilti Bauchemie, im folgenden Klebstoff B genannt. Für jeden Klebstoff wurden vorab im Versuch die zentrische Druck- und Zugfestigkeit, die Querdehnzahl und der Elastizitätsmodul bestimmt, s. Tab. 5.1. Zum Vergleich sind in Tab. 5.1 die Herstellerangaben mit aufgenommen worden (jeweils untere Zeile).

Tab. 5.1: Kennwerte der verwendeten Klebstoffe

| Klebstoff  | Druckfestigkeit<br>(DIN 53554)<br>[MPa] | Zugfestigkeit<br>(DIN 53455)<br>[MPa] | E-Modul<br>(DIN 53457)<br>[MPa] | Querdehnzahl<br>[-] |
|------------|---|---------------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| A          | 92,7                                    | 31,0                                  | 5811                            | 0,33                |
| Hersteller | 75,0                                    | 19,0                                  | 5780                            | -                   |
| B          | 106,4                                   | 29,2                                  | 10597                           | 0,29                |
| Hersteller | 110,0                                   | -                                     | 11000                           | -                   |

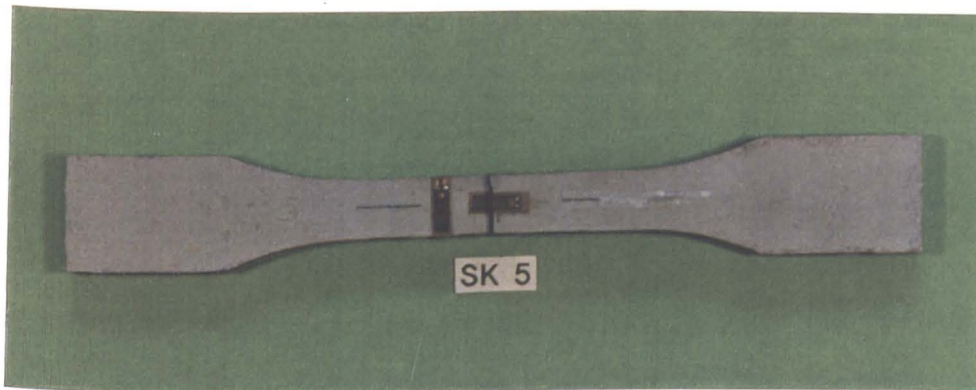
Die Bestimmung der Kennwerte erfolgte normgemäß. Die Querdehnzahl wurde aus dem Quotienten der gemessenen Querdehnung und der Längsdehnung im zentrischen Zugversuch am reinen Klebstoff ohne Fügeteilbeeinflussung bestimmt. Bild 5.2 zeigt die Versuchskörper mit DMS-Applikation.

### 5.4 Meßsystem

Zur Bestimmung des Verformungsverhaltens der Klebefuge wurden die Verschiebungen in und normal zur Fugenrichtung mit Hilfe von Wegaufnehmern W 0,5 bestimmt. In Bild 5.1 ist ebenfalls die Anordnung der Wegaufnehmer auf Aluminiumwinkeln am Versuchskörper dargestellt. Die Befestigung der Winkel erfolgte durch je zwei Schrauben im Abstand von 15 Millimetern. Die



Klebstoff A



Klebstoff B

Bild 5.2: Probekörper zur Bestimmung der Querdehnzahl

von den Wegaufnehmern gemessene Relativverschiebung setzt sich aus der Klebschichtverformung, zuzüglich eines Verformungsanteiles resultierend aus der Dehnung der stählernen Prismenhälften zusammen. Für die Auswertung sind nur die Klebschichtverformungen relevant, d.h. die mitgemessene Verformung der Fügeteile muß subtrahiert werden. Dazu wurden s.g. Blindproben hergestellt, die die gleichen Abmessungen wie die Versuchskörper haben, jedoch keine Klebefuge aufweisen. Mit einer identischen Wegaufnehmerbestückung wird im Versuch der Anteil der Eigenverformung bestimmt und kann anschließend von der gemessenen Gesamtverformung subtrahiert werden.

Die Meßwerte wurden mit Hilfe eines digitalen Meßverstärkers vom Typ DMC 9012 der Fa. Hottinger&Baldwin Meßtechnik in Verbindung mit einem PC 386 aufgenommen. Hiermit konnten sowohl im statischen, als auch im dynamischen Versuch in definierten Zeitintervallen alle Meßstellen ohne Versuchsunterbrechung abgefragt werden. Zusätzlich wurde eine Vielstellenmeßanlage vom Typ UPH 3200 verwendet.

### 5.5 Versuchsaufbau

Die statischen und dynamischen Druck- und Zugversuche wurden in einer servohydraulischen Universalprüfmaschine RE25 mit einer maximalen Kraft von 250 kN dynamisch bzw. 400 kN statisch durchgeführt. Bild 5.3 zeigt sche-

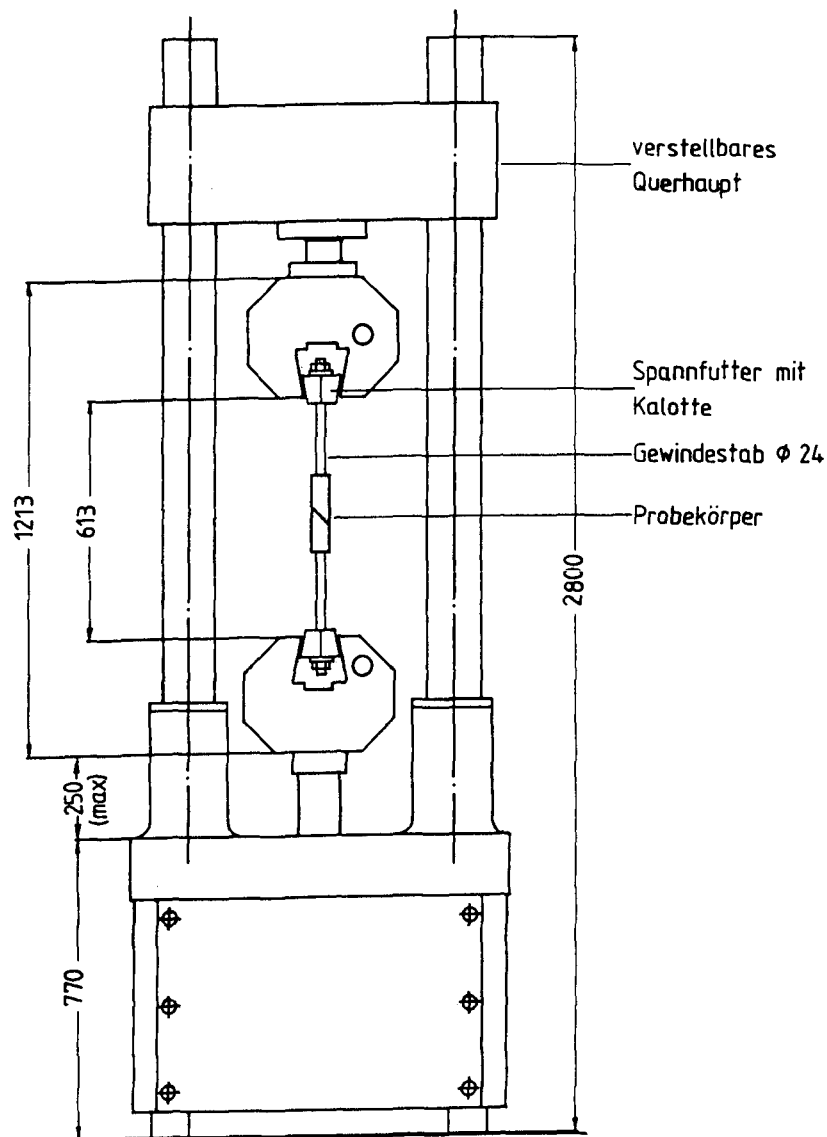


Bild 5.3: Prüfmaschine für die zentrischen Zugversuche mit eingebautem Prüfkörper



matisch die Prüfmaschine mit eingebautem Zugkörper. Hier erfolgte die Belastung des Versuchskörpers über Gewindestangen  $\varnothing 24$  mm, die in das stirnseitige Innengewinde der Versuchskörperhälften griffen. Im oberen und unteren Spannfutter sorgten Kalotten für eine momentenfreie Lagerung der Gewindestangen. Im Druckversuch wurde die Pressenkraft über Lasteinleitungsplatten, die gelenkig mit der Spannvorrichtung verbunden waren, durch stirnseitige Kontaktpressung in die Prismenhälften eingeleitet.

## 5.6 Versuchsprogramm

Das Versuchsprogramm sah statische und dynamische Zug- und Druckversuche an verklebten Stahlprismen nach Tab. 5.2 vor. Insgesamt wurden 106 Versuche durchgeführt, zuzüglich von 4 Versuchen zur Bestimmung des Eigenverformungsanteiles der Stahlprismen.

Tab.5.2: Übersicht über das Versuchsprogramm (Versuchsanzahl für Zug/Druck)

| Fugenwinkel | statisch    |             | dynamisch   |             |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|             | Klebstoff A | Klebstoff B | Klebstoff A | Klebstoff B |
| 0°          | 5/1         | 1/0         | 11/0        | 0/0         |
| 15°         | 4/0         | 3/1         | 8/0         | 0/0         |
| 30°         | 6/6         | 3/1         | 13/5        | 2/0         |
| 60°         | 7/5         | 3/3         | 10/4        | 4/0         |

## 5.7 Versuchsdurchführung

Die statischen Versuche wurden weggeregelt durchgeführt. Regelgröße war bei Fugenneigungswinkeln  $\alpha > 0^\circ$  die Verschiebung in Fugenlängsrichtung. Bei den  $0^\circ$ -Körpern wurde normal zur Fugerichtung weggeregelt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug  $v = 0,0005$  mm/min.

## 5.8 Versuchsergebnisse

### 5.8.1 Blindproben

Die Eigenverformung der Fügeteile entlang der Meßstrecke wurde mit Blindproben gemessen. Die massiven Stahlprismen ohne Klebefuge wurden mit

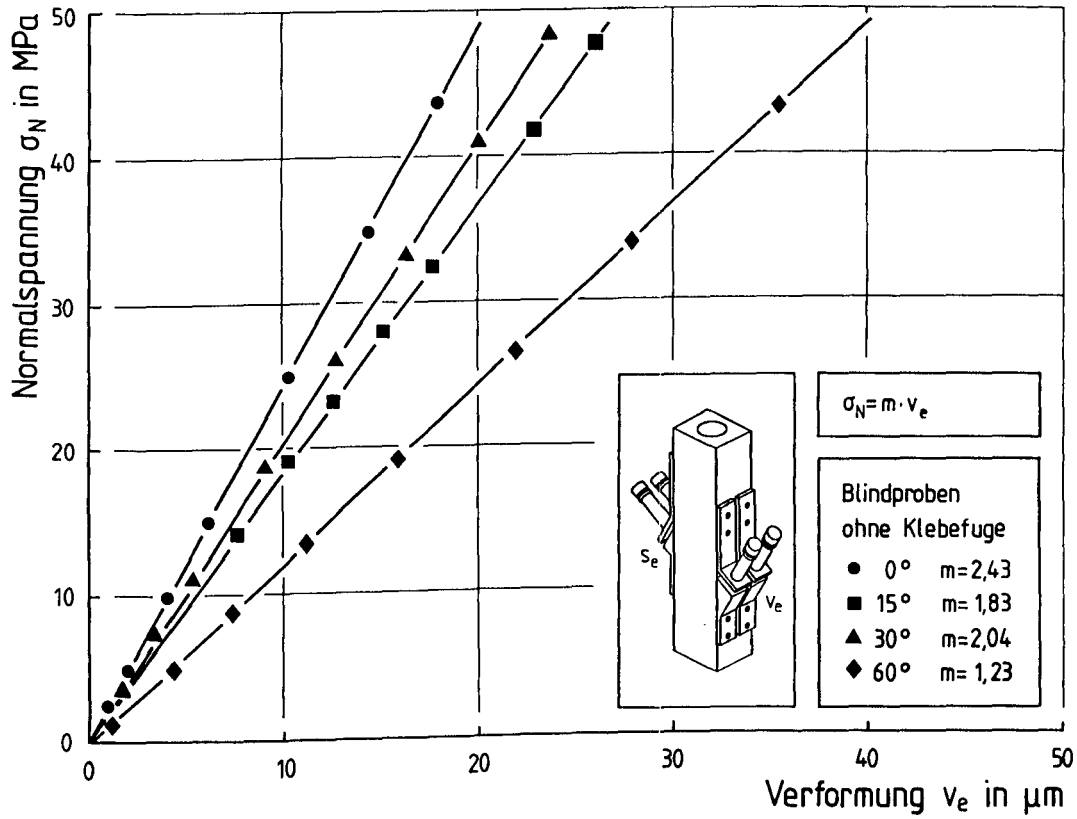


Bild 5.4: Normalspannungs-Verformungsbeziehung der Blindprobe

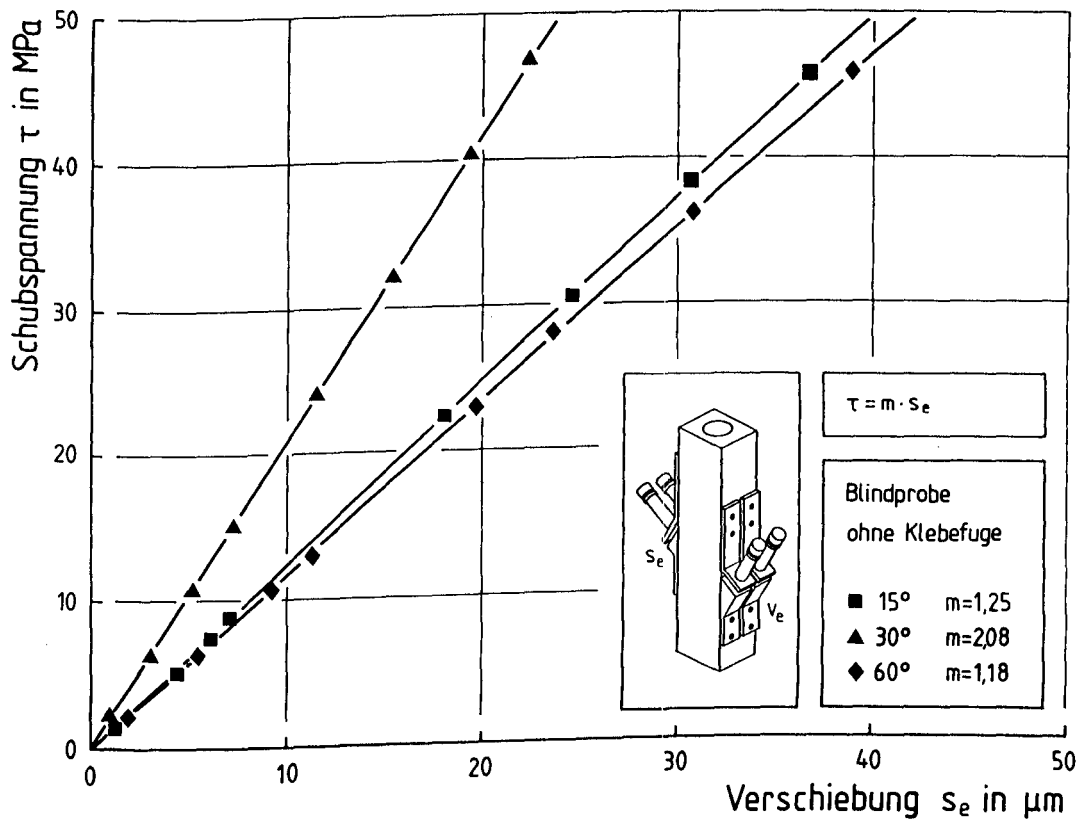


Bild 5.5: Schubspannungs-Verschiebungsziehung der Blindprobe

der zu einem Fugenwinkel gehörenden Wegaufnehmeranordnung bestückt. Damit wurde die Kraft-Verformungscharakteristik bestimmt. Da bei allen Versuchen die Belastung in den Stahlprismen eine elastische Beanspruchung erzeugte, verlaufen die an den Blindproben ermittelten Spannungs-Verformungsbeziehungen für alle Fugenneigungen linear, s. Bild 5.4 und 5.5. Mit der entsprechenden Korrekturfunktion nach Gl. (5.1) kann der Eigenverformungsanteil  $v_e$ , bzw.  $s_e$  bestimmt werden.

$$v_e = \sigma_n/m, \text{ bzw. } s_e = \tau/m \quad (5.1)$$

mit dem Steigungsfaktor  $m$  der Korrekturgeraden.

Diese Verformungsanteile sind im folgenden bei allen Darstellungen berücksichtigt.

### 5.8.2 Statische Versuche

Aus den erreichten Bruchlasten wurden die Spannungen in und normal zur Fugenrichtung für den einachsigen Spannungszustand mit  $\sigma_y = 0$ ,  $\tau_{xy} = 0$  bestimmt:

$$\sigma_\alpha = \sigma_0 \cos^2 \alpha \quad (5.2)$$

$$\tau = \sigma_0 \sin \alpha \cos \alpha \quad (5.3)$$

$$\sigma_{\alpha+90} = \sigma_0 \sin^2 \alpha \quad (5.4)$$

Der Bruch trat bei allen Versuchen durch Fugenversagen ein. Alle Versuche mit gleichem Fugenneigungswinkel zeigten die gleiche Bruchcharakteristik. Die unterschiedliche Klebstoffart führte nur zu Unterschieden in der Bruchlast, jedoch nicht zu signifikanten Differenzen in der Art des Versagens. Die Bilder 5.6 und 5.7 geben einen Überblick über die erreichten Bruchlasten in den statischen Druck- und Zugversuchen. Einzelwerte aller Versuche enthalten die Tab. A1 und A2 im Anhang.

Im folgenden wird exemplarisch für alle Fugenneigungen der Bruchvorgang an jeweils einem ausgewählten Versuch in Abhängigkeit von der Belastungsart beschrieben. Für die übrigen Ergebnisse wird auf den Anhang verwiesen. Die Auswertung der Versuche erfolgt durch Darstellung der gemessenen Verformungen und Kräfte im  $\sigma$ - $v$ - bzw. im  $\tau$ - $s$ -Diagramm, wobei die Spannungen  $\sigma$  und  $\tau$  nach Gl. (5.2) und (5.3) bestimmt wurden. Bei einigen Versuchen

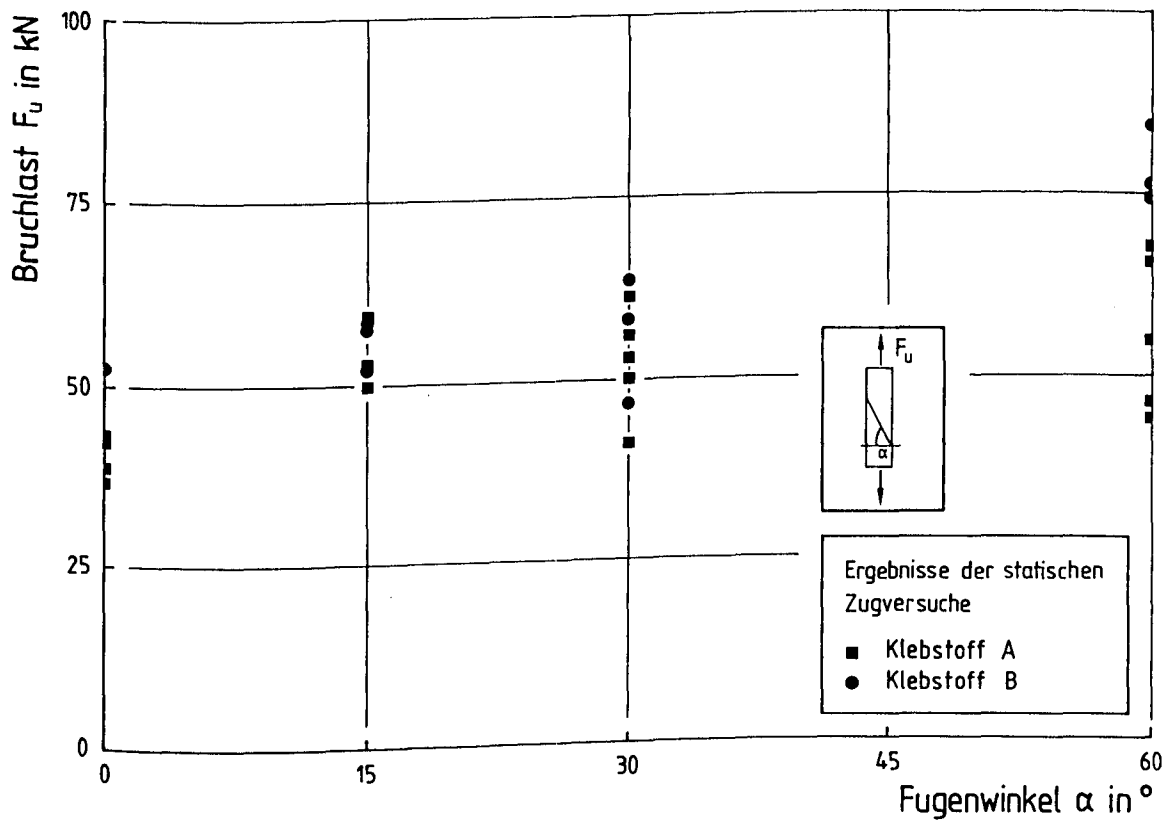


Bild 5.6: Ergebnisse der statischen Zugversuche

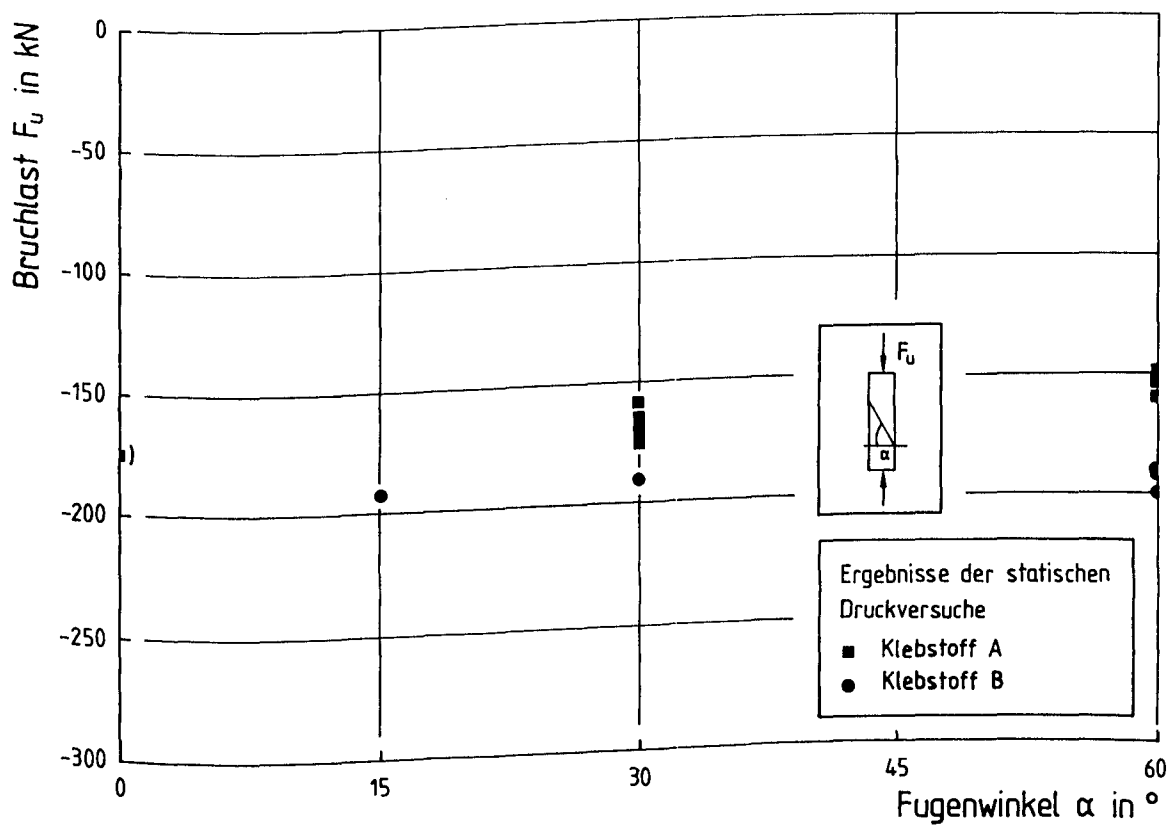


Bild 5.7: Ergebnisse der statischen Druckversuche

wurde nur die Bruchlast ohne Meßwerterfassung bestimmt.

#### 5.8.2.1 Fugenneigungswinkel $0^\circ$

Die statischen Zugversuche am  $0^\circ$ -Versuchskörper zeigten bis ca. 60 % der Bruchlast eine nahezu lineare Normalspannungs-Verformungs-Beziehung, s. Bild 5.8. Verschiebungen in Fugenlängsrichtung waren nicht feststellbar.

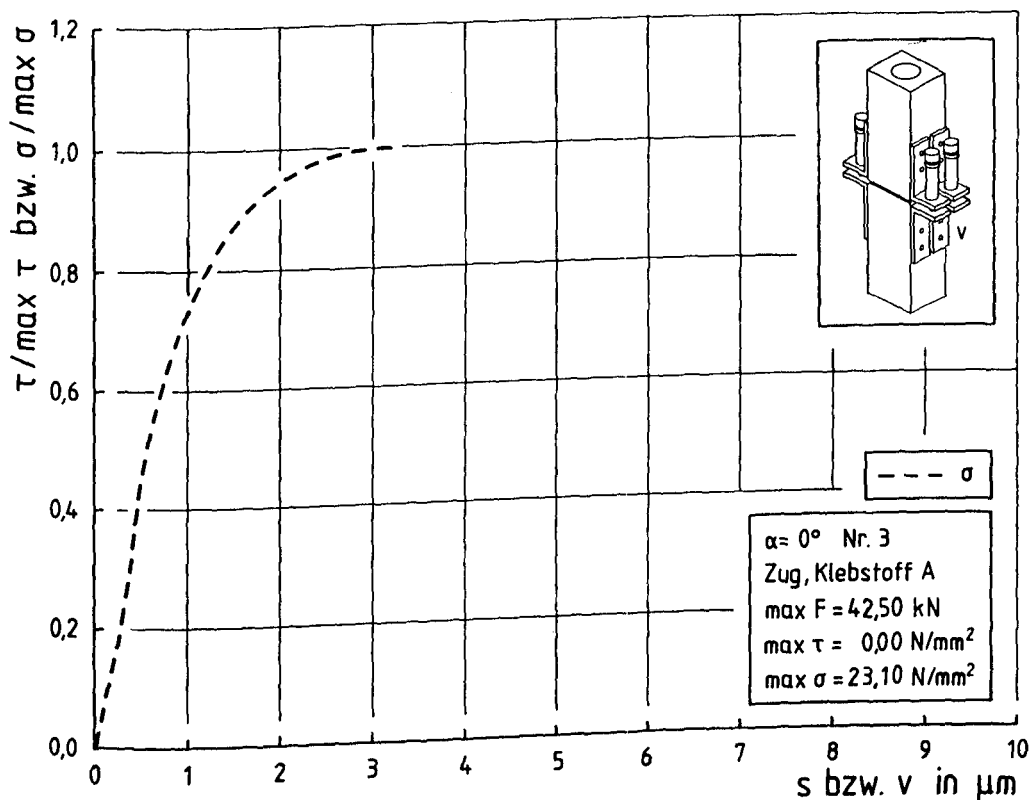


Bild 5.8: Versuch 0/3: Normalspannungs-Verformungsbeziehung

Die Maximallast trat bei allen Versuchen unter einer mittleren Verformung normal zur Fuge von ca. 1,5-3  $\mu\text{m}$  ein. Regelungsbedingt konnten die statischen Zugversuch nach Überschreiten der Maximallast nicht fortgesetzt werden, so daß es zum plötzlichen Versagen kam. Die Bruchfläche verläuft mittig im Klebstoff, lediglich bei Versuch 0/9 kam es an den Rändern zu einem Versagen der Grenzfläche Klebschicht-Stahl. Die Bilder 5.9 und 5.10 zeigen eine Aufsicht auf die Bruchflächen.



A



B

0/5

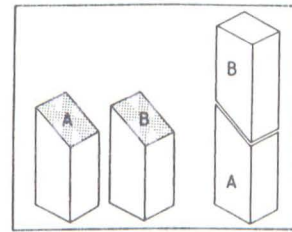
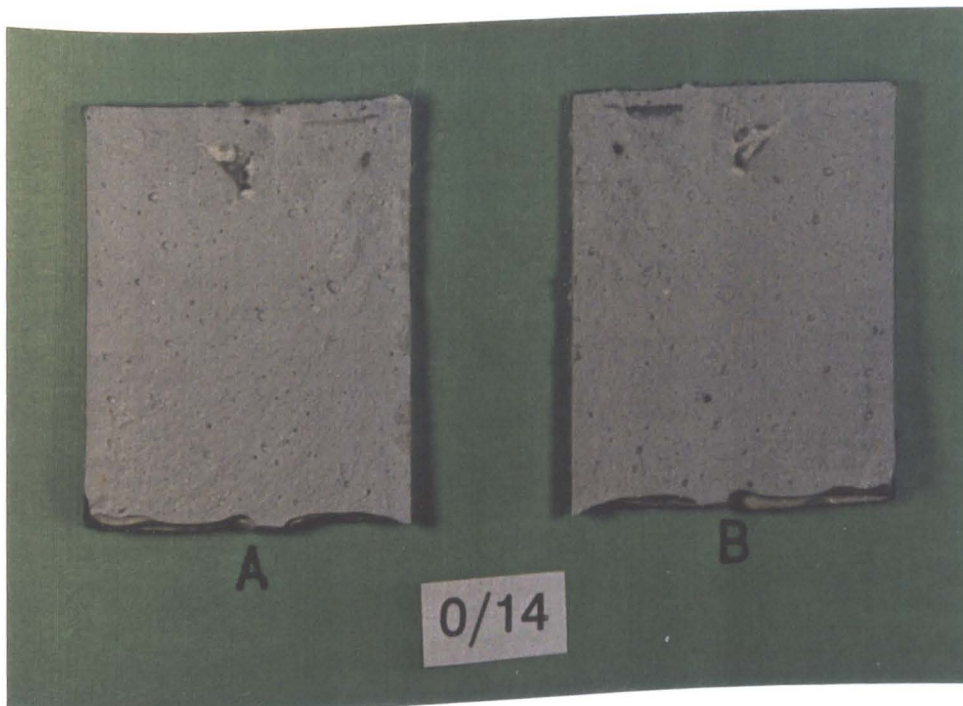


Bild 5.9: Versuch 0/5, Klebstoff A



A

B

0/14

Bild 5.10: Versuch 0/14, Klebstoff B

Ein statischer Druckversuch mit einem 0°-Versuchskörper wurde nach  $F = -275$  kN abgebrochen, da das Erreichen der Streckgrenze der Fügeteile im Bereich des stirnseitigen Innengewindes bevorstand. Erwartungsgemäß trat ein Versagen der Klebschicht nicht ein.

#### 5.8.2.2 Fugenneigungswinkel 15°

Die Versuche 15/1-4 und 15/9-11 wurden als statische Zugversuche mit einem Fugenneigungswinkel von 15° durchgeführt. Für den Zugversuch 15/9 sind die  $\tau$ -s und  $\sigma$ -v-Beziehungen exemplarisch in Bild 5.11 wiedergegeben. Die Spannungs-Verformungs-Beziehungen sind nahezu linear bis kurz vor Erreichen des Spannungsmaximums. Im Vergleich zu den 0°-Versuchen wechselt der Bruchort. Der Bruch tritt im Klebstoff, jedoch nahe der Fügeteiloberfläche auf. Ca. 95% der Klebschicht haften an einem Fügeteil. Bild 5.12 zeigt die Bruchfläche. Zum Vergleich ist in Bild 5.13 eine Bruchfläche des Versuchskörpers 15/2, Zugversuch mit Klebstoff A, dargestellt. Die wellige Oberflächenstruktur deutet auf einen reinen Kohäsionsbruch im Klebstoff hin.

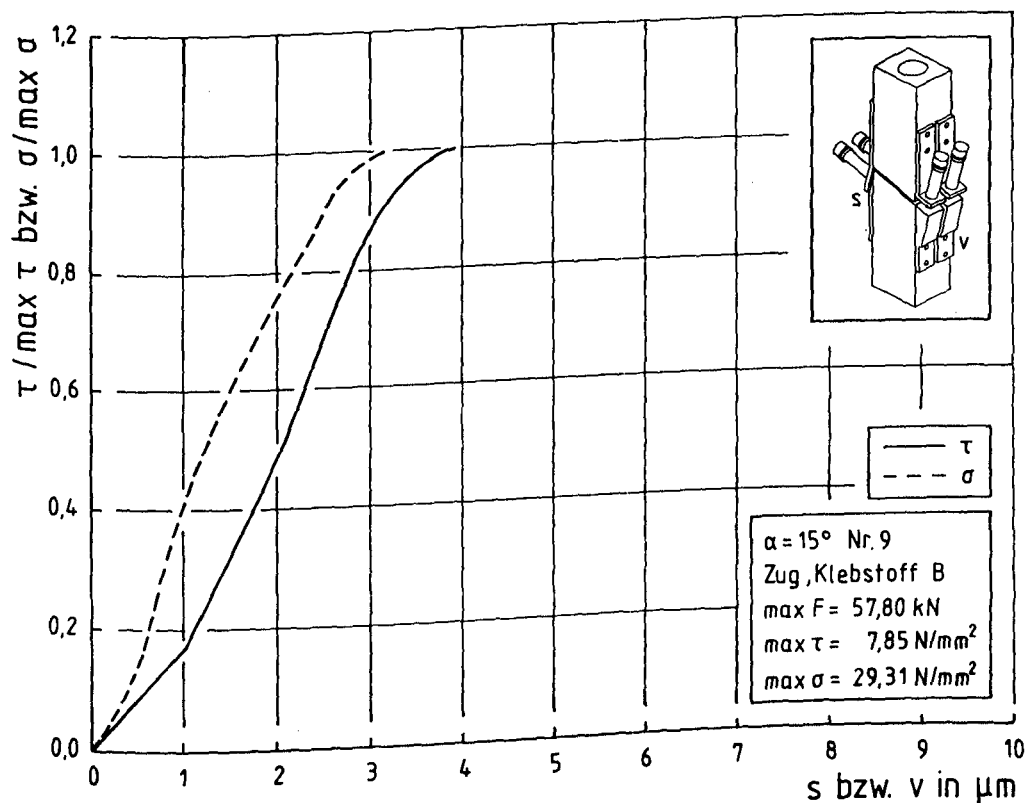


Bild 5.11: Versuch 15/9: Spannungs-Verformungs-Beziehungen

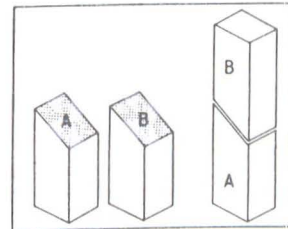
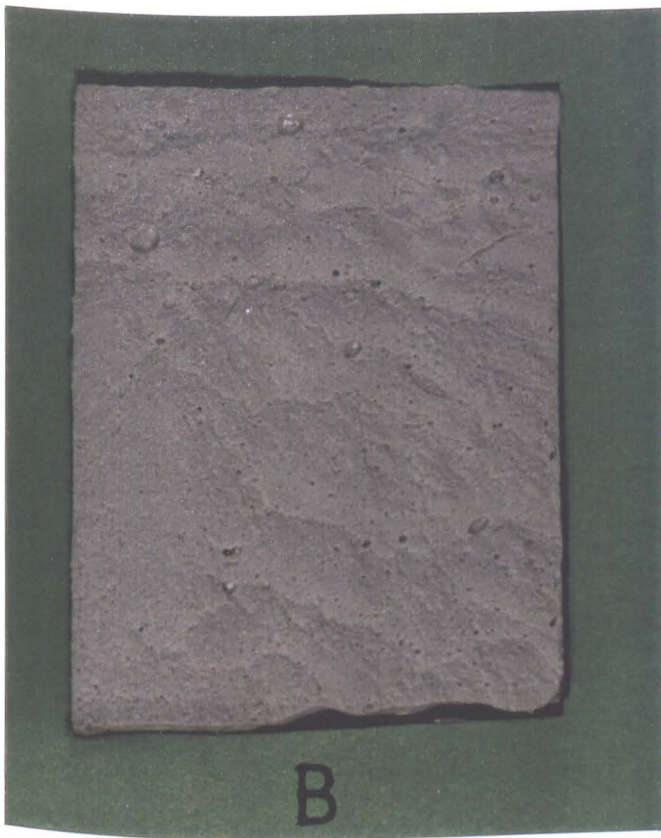


Bild 5.12: Versuch 15/9, Klebstoff B

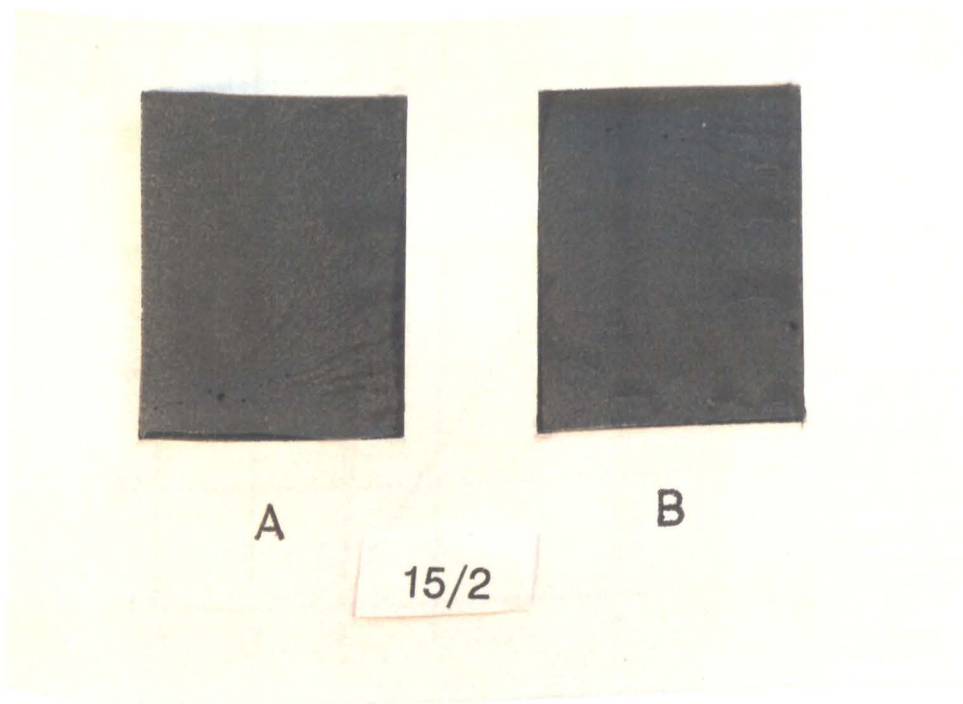


Bild 5.13: Versuch 15/2, Klebstoff A



### 5.8.2.3 Fugenneigungswinkel 30°

An den 30°-Versuchskörpern wurden je acht Zug-, bzw. Druckversuche vorgenommen. Die  $\tau$ -s bzw.  $\sigma$ -v-Beziehungen für einen Zugversuch (30/17, Klebstoff A) zeigt exemplarisch Bild 5.14. Die Bruchfläche verläuft an der Grenzfläche Stahl-Klebstoff, aber im Klebstoff, s. Bild 5.15.

Beim statischen Druckversuch 30/7, Klebstoff A, trat ein Kohäsionsbruch im Klebstoff auf, der sich durch eine ausgeprägte Rißbildung mit hieraus resultierender starker Verschiebungszunahme in Fugenlängsrichtung ankündigte. In Bild 5.16 ist das  $\tau$ -s-Diagramm wiedergegeben. Die Bilder 5.17 bis 5.19 zeigen die Bruchfläche in der Ansicht und als Detailaufnahmen in der Aufsicht. Zu erkennen ist in Bild 5.17 die große Verschiebung in Längsrichtung sowie der Rißverlauf in der Klebschicht. Unter 60facher Vergrößerung ist in Bild 5.19 ein Ausschnitt aus der Bruchfläche zu sehen. Erkennbar ist die Bruchart 'reiner Kohäsionsbruch' durch die starke Ausbildung von Konsolen in der Klebschicht.

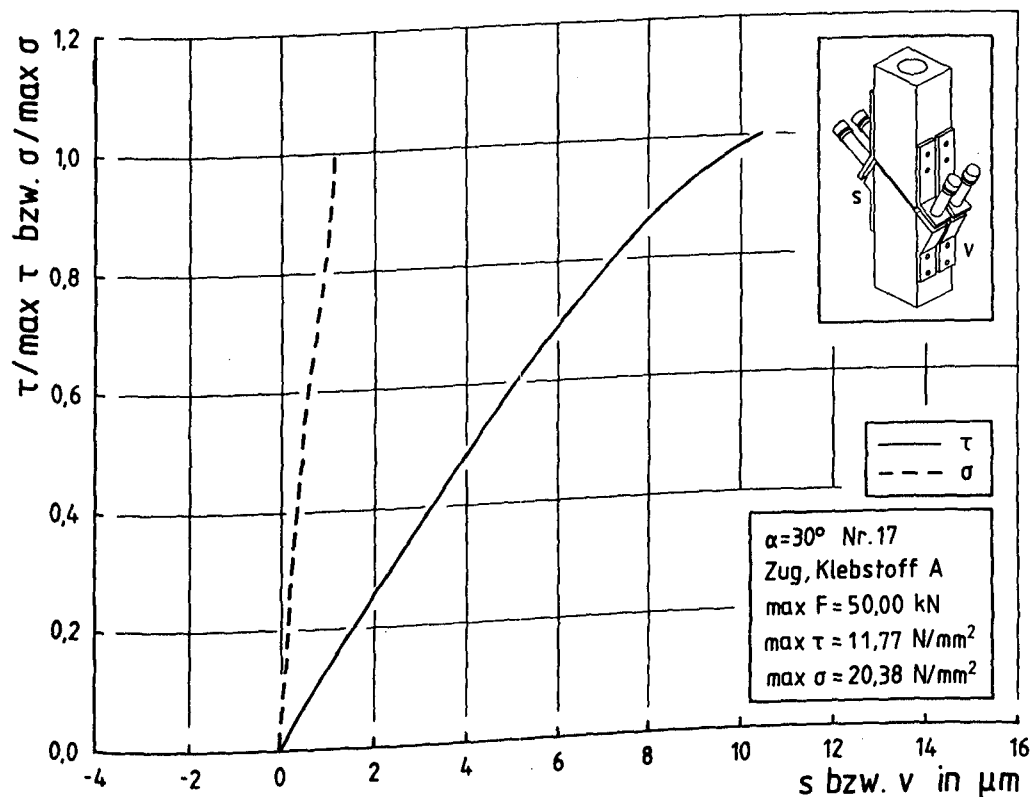


Bild 5.14: Versuch 30/17: Spannungs-Verformungsbeziehungen

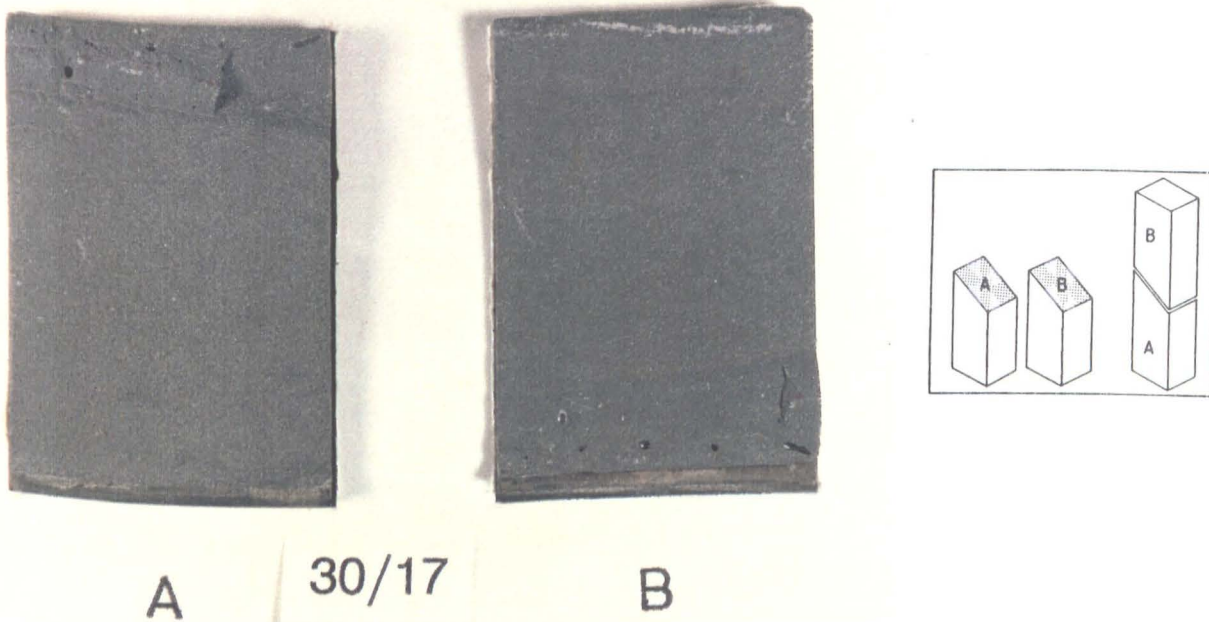


Bild 5.15: Versuch 30/17, Klebstoff A

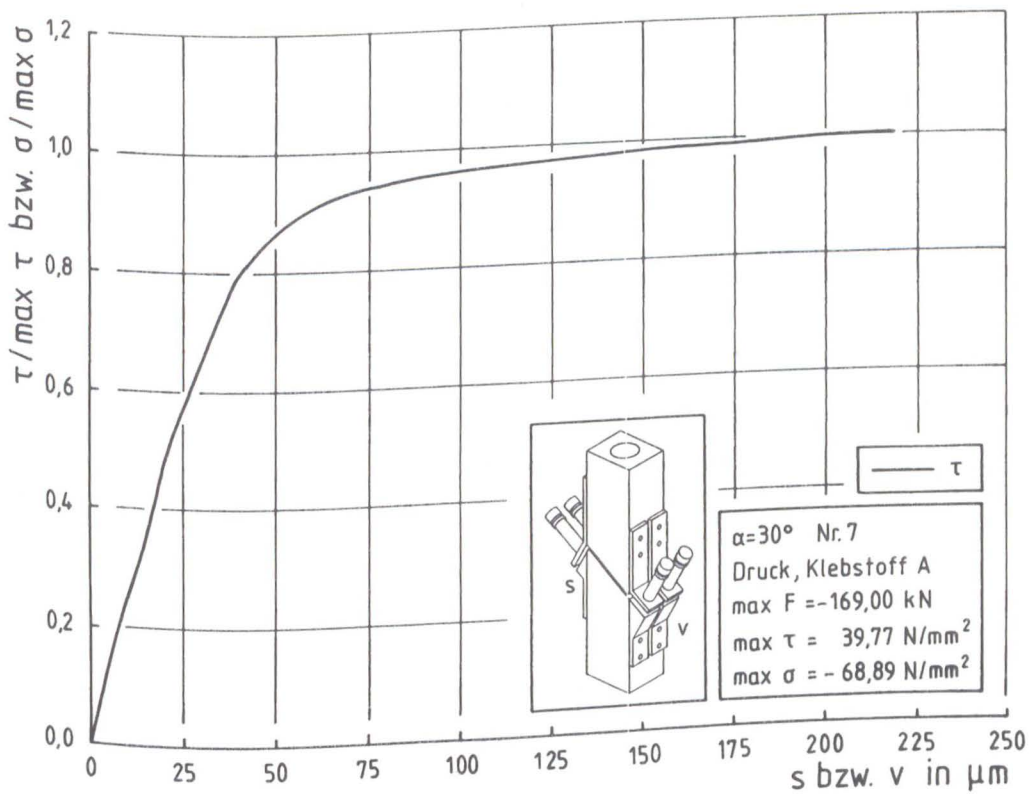


Bild 5.16: Versuch 30/7: Schubspannung-Verschiebungs-Beziehung

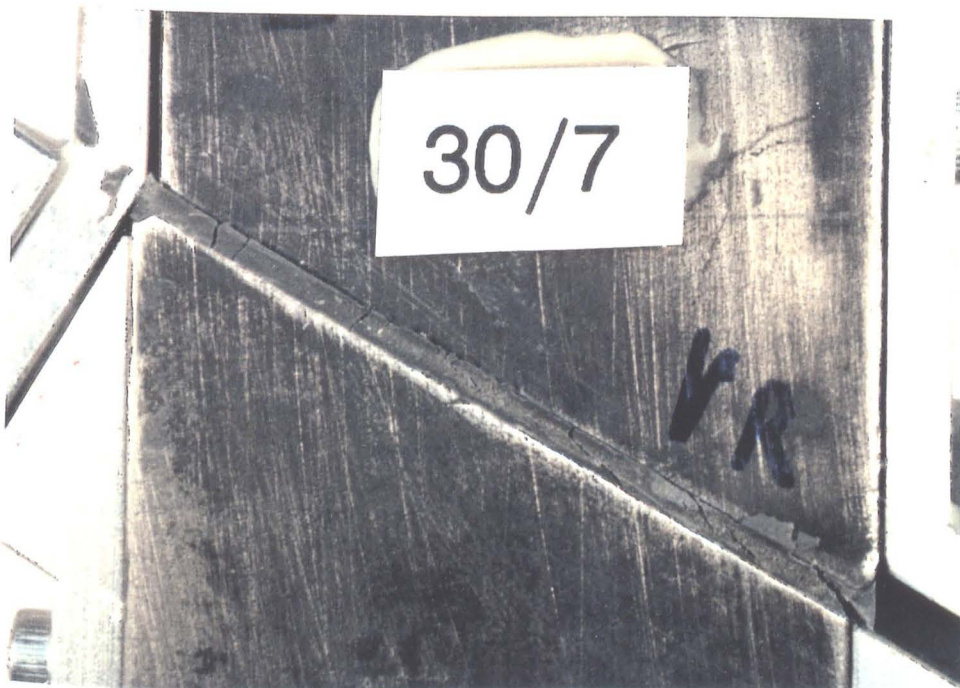


Bild 5.17: Versuch 30/7, Klebstoff A, Rißbild



Bild 5.18: Versuch 30/7: Blick auf die Bruchfläche



Bild 5.19: Detail

#### 5.8.2.4 Fugenneigungswinkel 60°

Die statischen Versuche mit den 60°-Versuchskörpern zeigen im Bruchverhalten die zuvor beobachtete Tendenz. Bei den

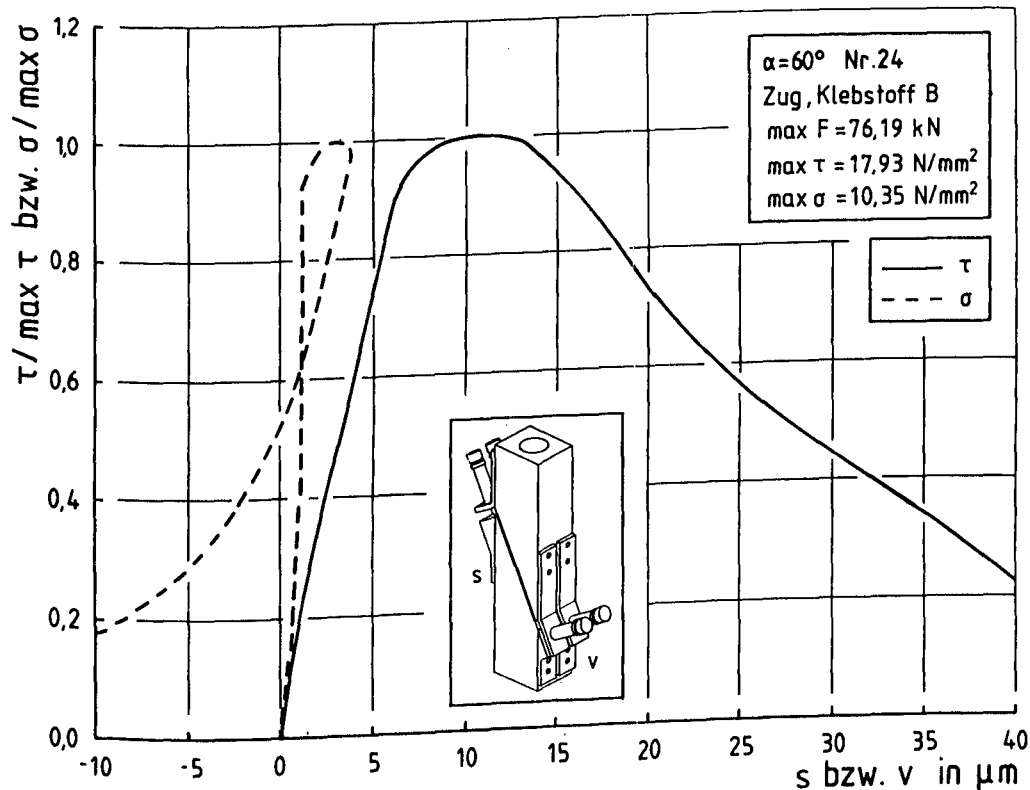


Bild 5.20: Versuch 60/24: Spannungs-Verformungs-Beziehungen

Zugversuchen tritt ein Bruch an der Grenzfläche Stahl-Klebstoff auf, jedoch mit leichten Klebstoffrückständen auf der Stahlfläche, s. Bild 5.21 und 5.22. Bei den statischen Druckversuchen trat ein Kohäsionsbruch im Klebstoff auf. Aufgrund der hohen in Fugenrichtung wirkenden Schubspannungen im Vergleich zur Fugennormalspannung erfolgt das Versagen durch Abgleiten in der Ebene der größten Schubspannung unter großen Klebschichtverformungen. Bild 5.23 zeigt exemplarisch die  $\tau$ - $s$  und die  $\sigma$ - $v$ -Beziehungen für einen Druckversuch. Die gemessenen Schubverformungen  $s$  liegen weit im abfallenden Bereich der  $\tau$ - $s$ -Beziehung. Die Bruchfläche zeigt eine treppenförmige Oberflächenstruktur, s. Bild 5.24 und 5.25.

Die zuvor beschriebenen Versuchsergebnisse machen deutlich, daß es sich bei allen Brüchen um reine Kohäsionsbrüche im Klebstoff handelt. Adhäsionsbrüche waren nicht zu erkennen.



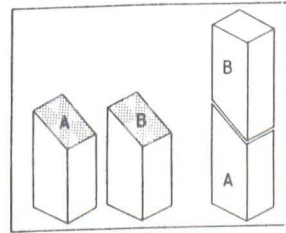
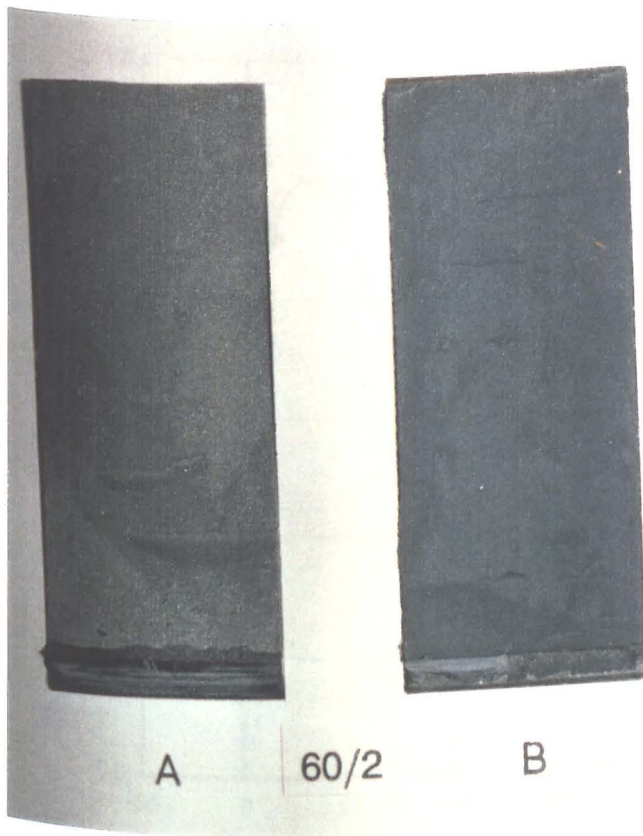


Bild 5.21: Versuch 60/2: Klebstoff A

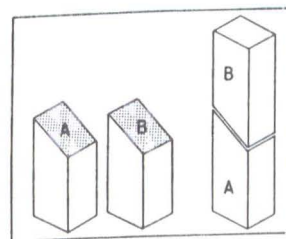
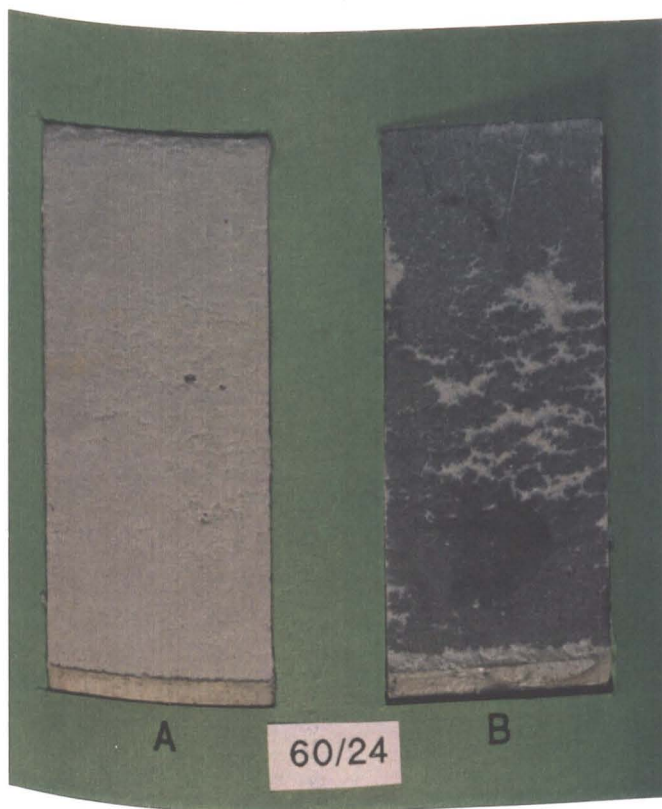


Bild 5.22: Versuch 60/24: Klebstoff B

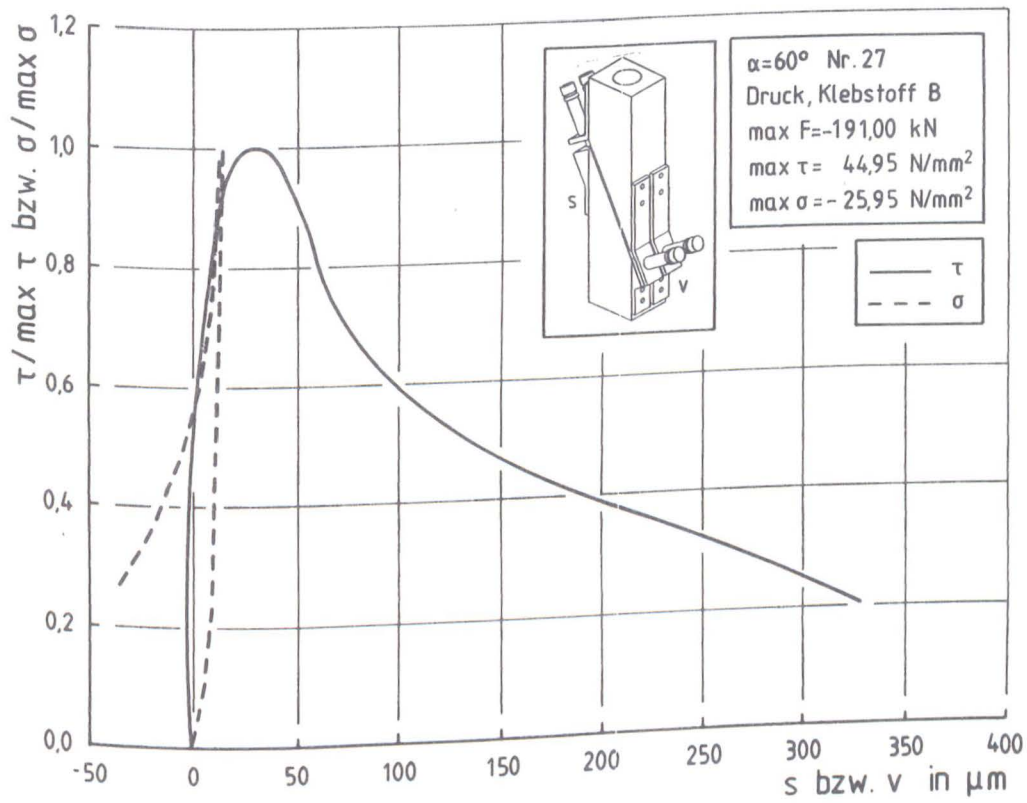


Bild 5.23: Versuch 60/27, Spannungs-Verformungs-Beziehungen

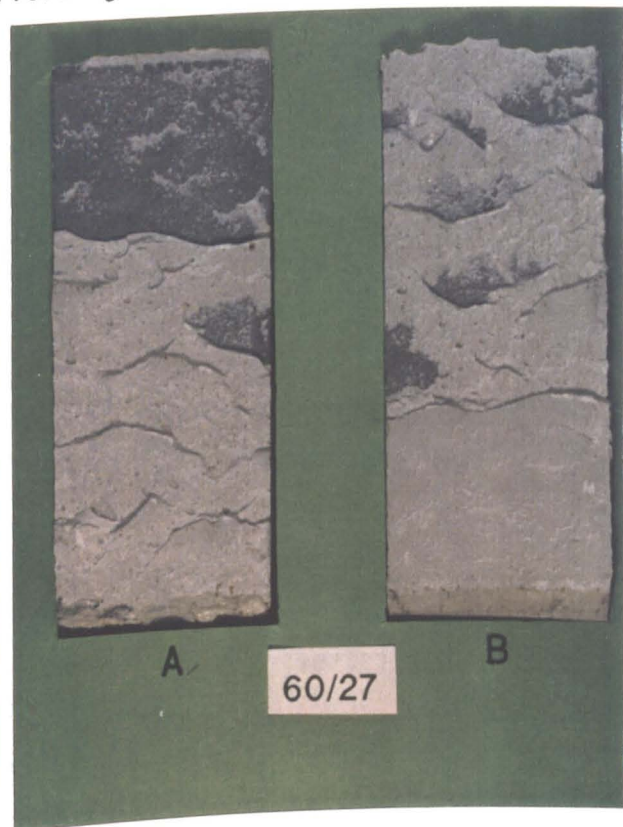


Bild 5.24: Versuch 60/6: Klebstoff A Bild 5.25: Versuch 60/27: Klebstoff B

## 5.9 Bruchkriterium für statische Beanspruchung

### 5.9.1 Spannungszustand in der Klebefuge

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde vorausgesetzt, daß die Spannungen gleichmäßig über die Klebschichtdicke verteilt sind. Der Spannungszustand in der Klebefuge wird jedoch durch das Vorhandensein von Spannungsspitzen, resultierend aus der Krafteinleitung infolge Querdehnungsbehinderung der Klebschicht an den starren Fügeteilen bestimmt. Die hieraus resultierende Fugenlängsspannung  $\sigma_x$  wird durch eine Schubspannung  $\tau$  aufgebaut und nimmt über die Klebschichtdicke ab. Bild 5.26 zeigt qualitativ den Verlauf von  $\sigma_x$  über die Klebschichtdicke. Bei dicken

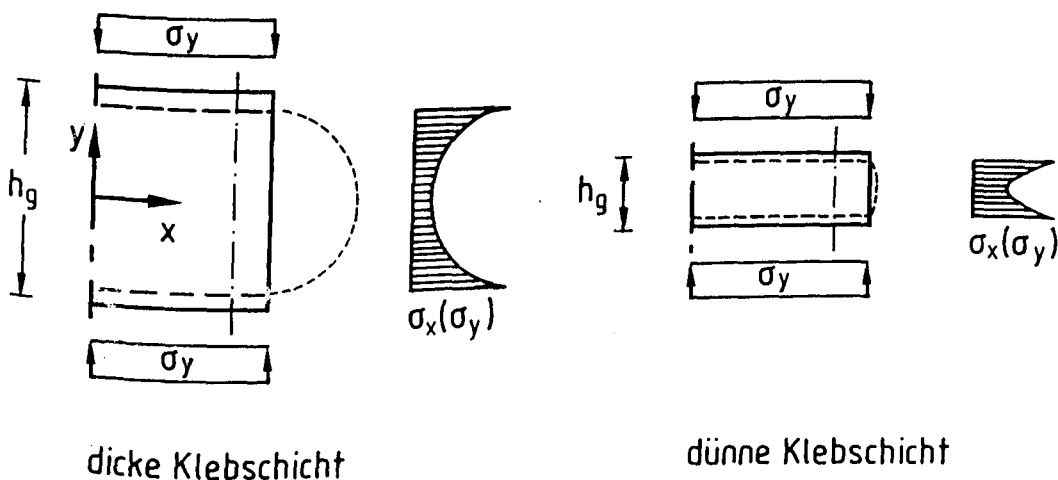


Bild 5.26: Qualitative Darstellung der Spannungsverteilung infolge Querdehnungsbehinderung

Klebschichten bleibt der mittlere Bereich unbeeinflusst von der festigkeitssteigernden Wirkung der Querdehnungsbehinderung, so daß das Versagen i.d.R. in diesem Bereich auftritt. Dünne Klebefugen besitzen demzufolge eine größere Festigkeit, s. auch Kap. 4.1.

Aus Gleichgewichtsbetrachtungen am Element nach Bild 5.27 wird deutlich, daß am Beginn der Klebung ebenfalls eine Fugennormalspannung  $\sigma_y$  wirken muß. Dieser Randbereich, in dem der Spannungszustand ungleichförmig verläuft, ist von der Länge der Klebefläche unabhängig und beträgt nach [21] ungefähr das dreifache der Klebschichtdicke. In der hier vorhandenen Klebverbindung liegt das Verhältnis von Überlappungslänge zu Klebschichtdicke bei ca. 25:1 bis 50:1, je nach Fugenneigungswinkel, so daß der Spannungszustand zur Ermittlung eines Bruchkriteriums als homogen angesehen werden kann.

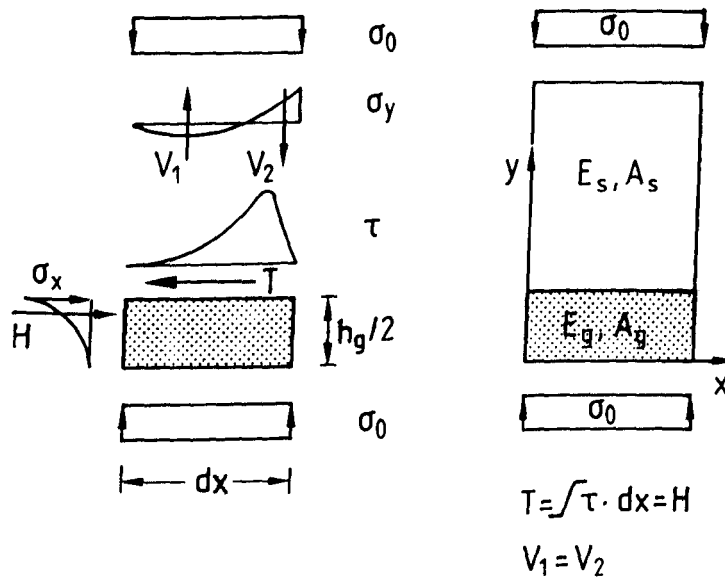


Bild 5.27: Gleichgewichtsbedingungen am Klebschichtelement

### 5.9.2 Bruchkriterium

Auf Basis der durchgeführten Versuche wird ein Bruchkriterium für die Verbindung Stahl-Klebstoff entwickelt. Da alle Versuche als einachsige Zug- und Druckversuche durchgeführt wurden, wird ein Bruchkriterium nur als Einhüllende der einachsigen Spannungskreise für die Hauptzug-, bzw. Hauptdruckspannung angegeben werden können. Zur Beschreibung der Tragfähigkeit unter beliebigen Kombinationen von  $\tau$  und  $\sigma$  können die gewählten Versuchskörper nicht dienen. Hierzu sind apparativ aufwendigere Versuche erforderlich, wie z.B. Torsions-Zug/Druck-Versuche, s. z.B. [5], [9].

Werden die erzielten Maximalwerte der Spannungen im  $\tau$ - $\sigma$ -Diagramm in s.g. Mohr'scher Darstellung aufgetragen, ergibt sich in Abhängigkeit des



verwendeten Klebstoffes die Darstellung nach Bild 5.28 und 5.29. Ebenfalls eingetragen sind die Spannungskreise für einachsigen Zug, bzw. einachsigen Druck. Diese Werte wurden an reinen Klebstoffproben im zentrischen Druck. Zugversuch nach DIN 53455 bzw. im Druckversuch nach DIN 53554 bestimmt. Deutlich zu erkennen ist, daß der Schnittpunkt der Spannungskreise der einachsigen Druck- und Zugfestigkeit des Klebstoffes mit den Diagonalen der Fugenneigungswinkel im Streubereich der Ergebnisse der Prismenversuche liegt.

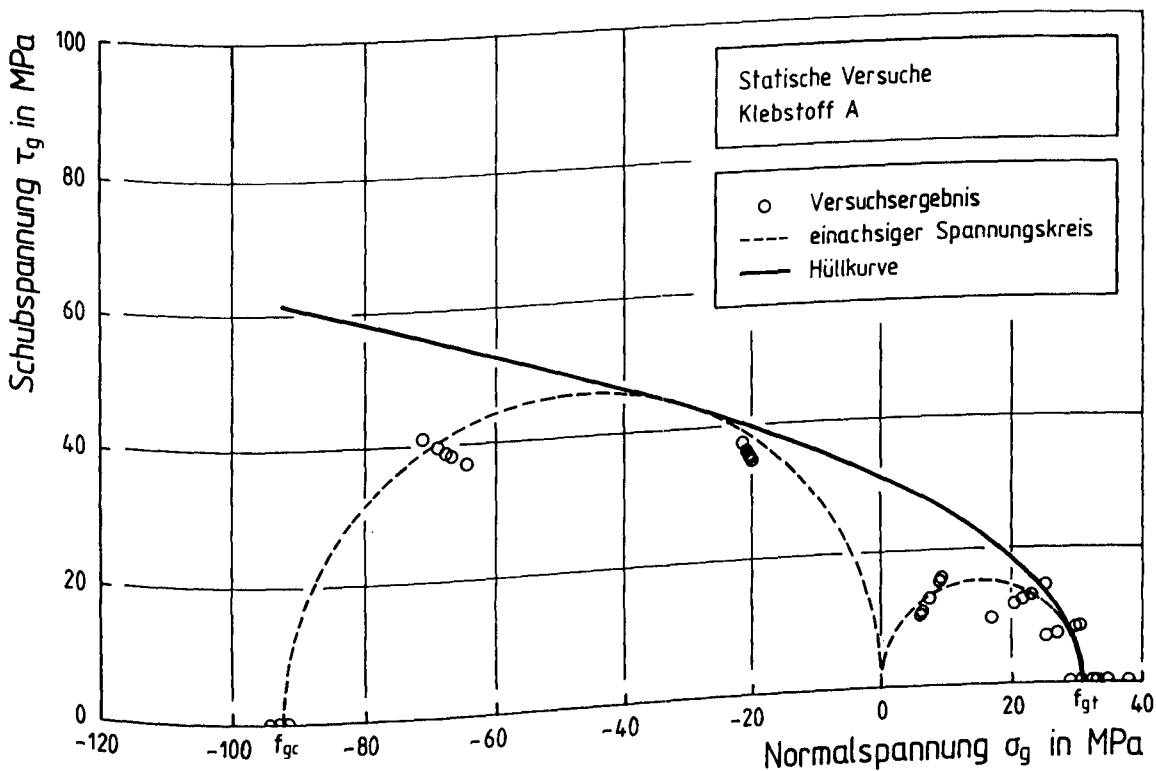


Bild 5.28: Ergebnisse der statischen Zug- und Druckversuche in  $\tau$ - $\sigma$ -Darstellung, Klebstoff A

Die Lage der Versuchsergebnisse auf den einachsigen Spannungskreisen beweist die Schlußfolgerung, daß nicht die Tragfähigkeit der Kontaktzone Stahl-Klebstoff, z.B. beschrieben durch  $\tau = \mu \cdot \sigma_n + \beta_s$ , sondern die Kohäsionsfestigkeit des Klebstoffes für die Festigkeit maßgebend ist. Neben den fugenbezogenen Spannungen  $\sigma_{gn}$ ,  $\tau_g$  muß die Normalspannung  $\sigma_{gl}$  in Fugenlängsrichtung mit berücksichtigt werden. Als einfaches Bruchkriterium

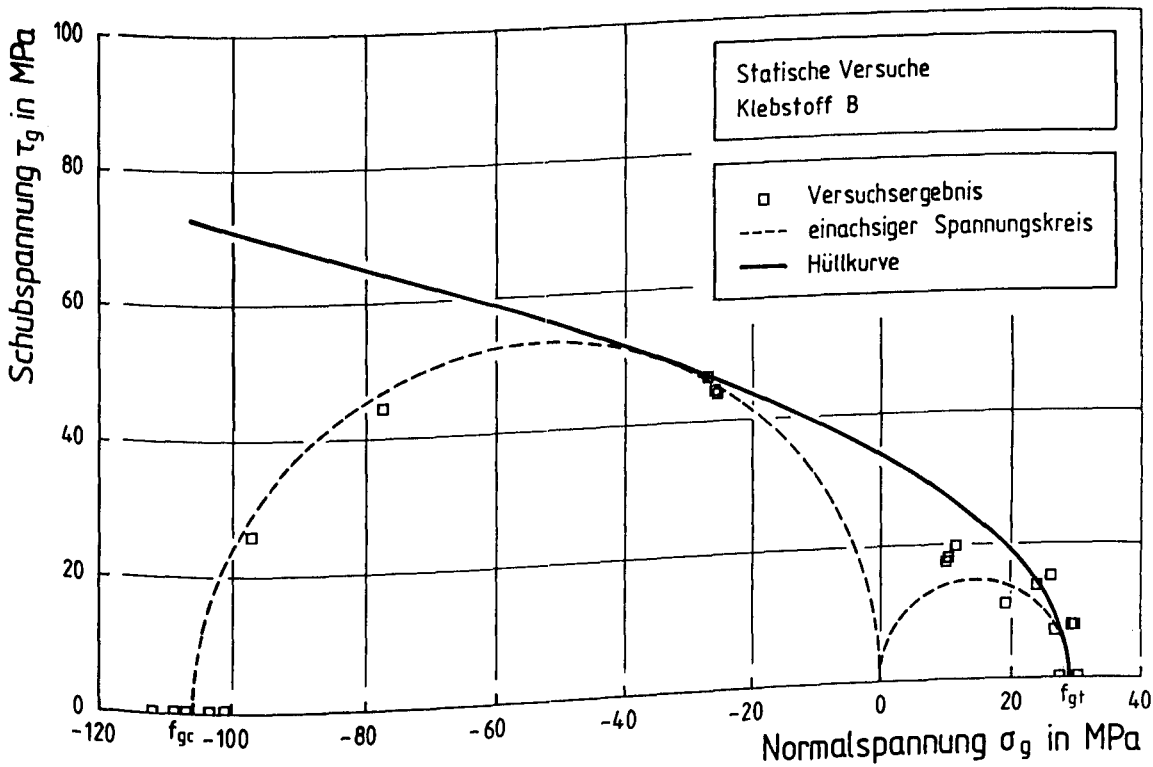


Bild 5.29: Ergebnisse der statischen Zug- und Druckversuche in  $\tau$ - $\sigma$ -Darstellung, Klebstoff B

wird somit ein Kriterium für isotrope Werkstoffe formuliert, das basierend auf einer parabolischen Hüllkurve nach Mohr, für die Grenzzustände der einachsigen Festigkeit Gültigkeit besitzen soll.

Nach Mohr, z.B. aus /10/, /11/, /12/, haben alle ertragbaren Beanspruchungszustände eines Werkstoffes eine gemeinsame Hüllkurve. Die parabolische Einhüllende mit Scheitel auf der Abzisse läßt sich mit Kenntnis der einachsigen Druck- und Zugfestigkeit nach Gl.(5.5) angeben

$$\tau^2 = [2f_{gt} - 2 \sqrt{(f_{gt}^2 + f_{gc}f_{gt}) + f_{gc}}] [f_{gt} - \sigma], \quad (5.5)$$

bzw. auf die einachsige Druckfestigkeit des Klebstoffes  $f_{gc}$  bezogen

$$\frac{\tau^2}{f_{gc}^2} = \kappa \left( 2 - 2 \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa}} \right) \left( \kappa - \frac{\sigma}{f_{gc}} \right) \quad (5.6)$$

$$\text{mit } \kappa = \frac{f_{gt}}{f_{gc}}$$

In den Bildern 5.28 und 5.29 sind die sich für die Versuchsergebnisse ergebenden parabolischen Hüllkurven eingetragen. Alle Spannungszustände, deren Spannungskreise zum Schnittpunkt mit der Hüllkurve kommen, führen definitionsgemäß zum Bruch. Stützpunkte für die Hüllkurve sind der Scheitel auf der Abzisse bei der einachsigen Zugfestigkeit sowie der Berührungspunkt des Parabelastes mit dem Spannungskreis der einachsigen Druckfestigkeit.

Die Grenzzustände der Tragfähigkeit bei Wahl einer parabolischen Hüllkurve, basierend auf den Versuchsergebnissen, decken den Bereich der einachsigen Zugbeanspruchung über die Zug-Druck- bis hin zur einachsigen Druckbeanspruchung ab. In der  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Darstellung entspricht dies dem 4. und 1. Quadranten, in Bild 5.30 schraffiert dargestellt. Hierbei wird vorausgesetzt, daß die zweiachsige Zugfestigkeit von der einachsigen nicht signifikant abweicht.

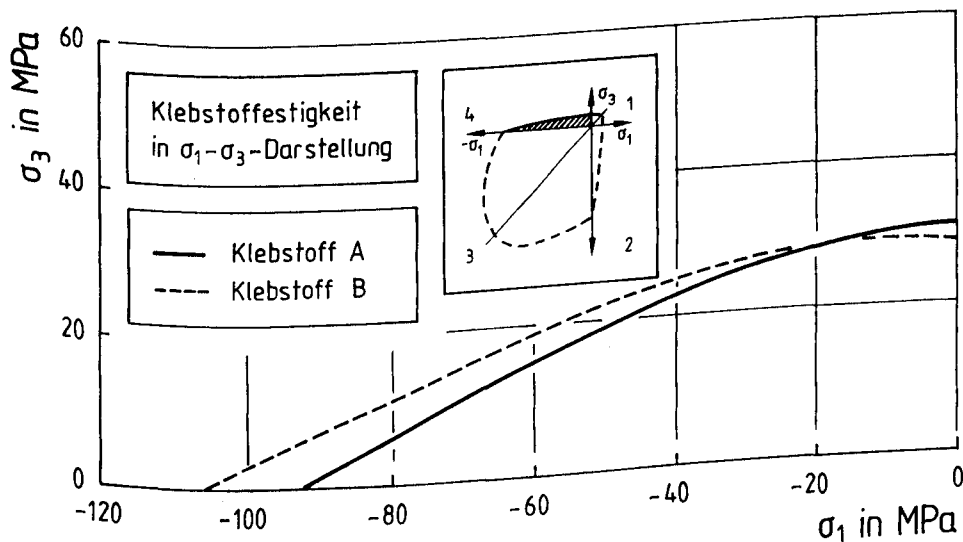


Bild 5.30: Bruchkriterium in  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ -Darstellung

### 5.9.3 Einfluß der Normalspannung $\sigma_1$ in Fugenlängsrichtung

Da die statischen Versuche gezeigt haben, daß die Normalspannung  $\sigma_1$  in

Fugenlängsrichtung einen Einfluß auf die Tragfähigkeit der Klebverbindung bei großer Schichtdicke ausübt, soll im folgenden die Auswirkung von  $\sigma_l$  bei bekanntem Bruchkriterium untersucht werden. Mit der Gleichung des Spannungskreises für den Spannungszustand in der Klebefuge nach Bild 5.31

$$[\sigma_\alpha - 0,5(\sigma_{gn} + \sigma_{gl})]^2 + \tau_\alpha^2 = 0,25[(\sigma_{gn} - \sigma_{gl})^2 + 4 \tau_g^2] \quad (5.7)$$

und der Gleichung der Hüllparabel, s. Gl.(5.5), kann nach den Kombinationen von  $\sigma_\alpha$  und  $\tau_\alpha$  gefragt werden, die bei Vorgabe eines bestimmten Wertes von  $\sigma_g$  zum Bruch führen.

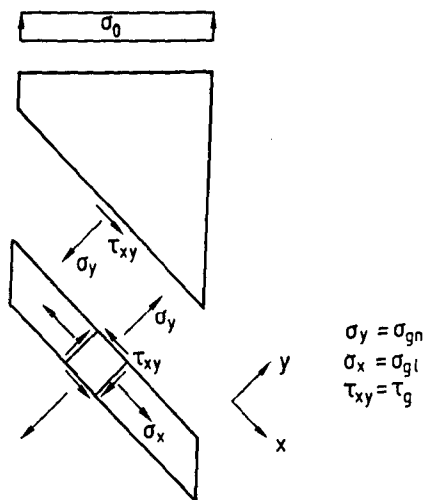


Bild 5.31: Spannungszustand in der Klebefuge

Das Auflösen nach  $\tau^2$  und Gleichsetzen von Gl. (5.5) und (5.7) führt zu Gl. 5.8)

$$\tau = \sqrt{bf_{gt} + \sigma_{gn}\sigma_{gl} - 0,25(b + \sigma_{gn} + \sigma_{gl})^2} \quad (5.8a)$$

$$\text{mit } b = 2f_{gt} - 2\sqrt{f_{gt}^2 + f_{gc}f_{gt}} + f_{gc}$$

Normiert man Gl.(5.8a) auf die einachsige Druckfestigkeit  $f_{gc}$ , so ergibt sich:

$$\frac{\tau}{f_{gc}} = \sqrt{b \cdot \kappa \cdot \frac{1}{f_{gc}} + \sigma_{gn} \cdot \sigma_{gl} - \frac{1}{4} (c - \sigma_{gn} - \sigma_{gl})^2} \quad (5.8b)$$

$$\text{mit } c = \frac{1}{f_{gc}} (2 \cdot \kappa - 2 \cdot \sqrt{\kappa^2 + \kappa} + 1)$$

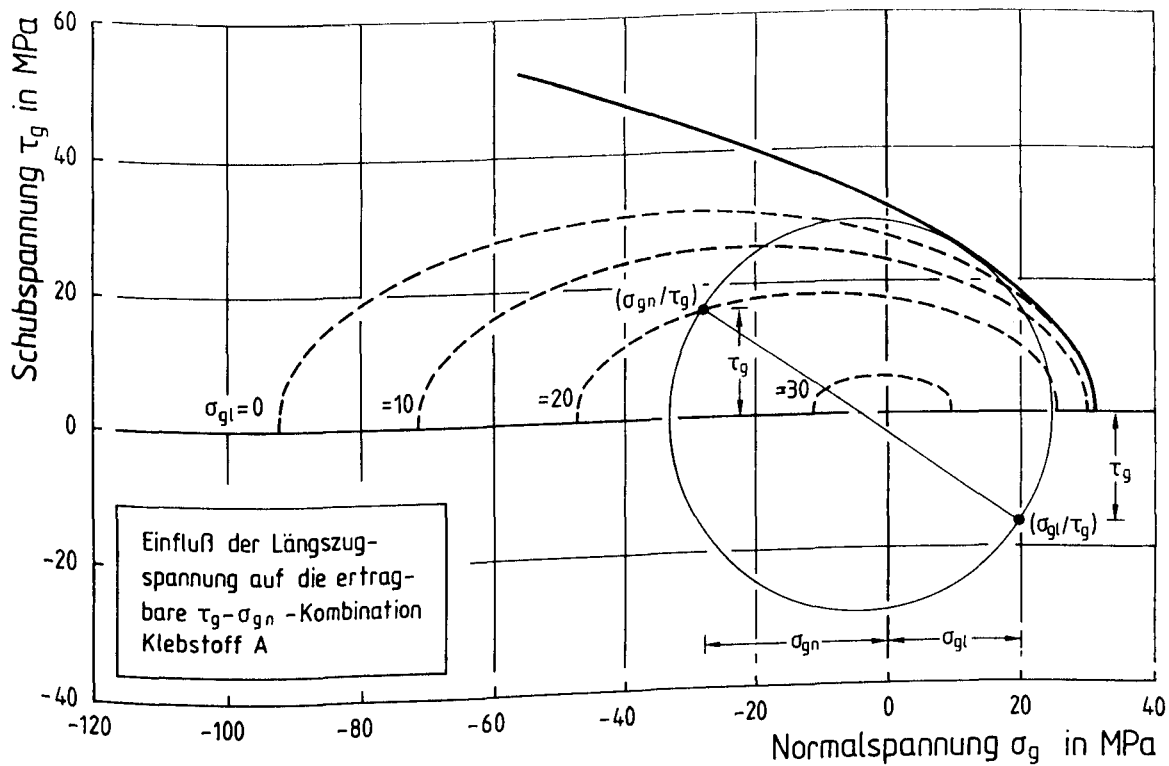


Bild 5.32: Einfluß einer Längszugspannung  $\sigma_{gl}$  auf die ertragbare  $\tau_g$ - $\sigma_{gn}$  Kombination

Bild 5.32 zeigt exemplarisch für Klebstoff A die Auswertung von Gl.(5.8) für verschiedene Längszugspannungen  $\sigma_{gl}$ . Mit zunehmender Längszugspannung wird die ertragbare Kombination aus  $\tau_g$  und  $\sigma_{gn}$  reduziert. Alle Kombinationen von  $\tau_g$  und  $\sigma_{gn}$ , die oberhalb der durch Gl.(5.8) beschriebenen Fläche in Bild 5.31 liegen, führen zum Bruch, wie die Konstruktion des zugehörigen Spannungskreises zeigt. Die Bruchgrenzflächen in  $\sigma_{gn}$ - $\sigma_{gl}$ - $\tau_g$ -Darstellung sind quantitativ für Klebstoff A in Bild 5.33 für Zugspannungen und in Bild 5.34 für Druckspannungen normal zur Klebefläche dargestellt.

Hiermit ist die Vorhersage der Tragfähigkeit einer Klebverbindung mit den beiden geprüften Klebstoffen unter einem beliebigen ebenen Spannungszustand in den unter Kapt. 5.8.2 genannten Grenzen möglich. Angewendet werden soll dieses Bruchkriterium bei Spannungsnachweisen für die Methode der geklebten Bewehrung. Auch eine Berücksichtigung von Querdruck im Bereich hoher Längszugspannungen, wie sie z.B. bei einer angepreßten Endverankerung vorkommen, wird mit Hilfe dieses Kriteriums möglich. Im folgenden Kapitel wird dieses Bruchkriterium für dynamische Belastung erweitert.

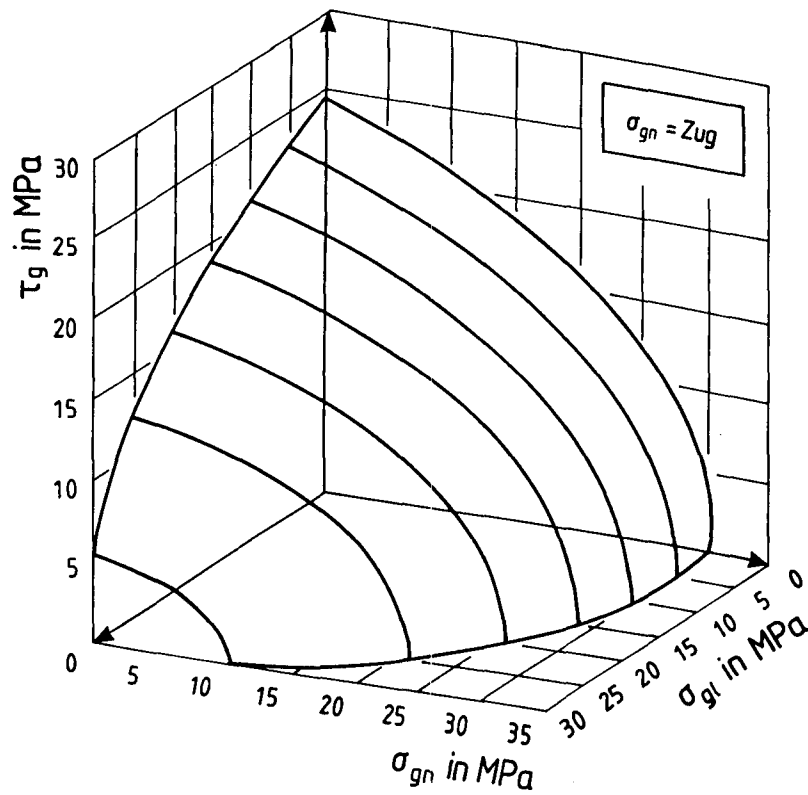


Bild 5.33: Bruchgrenzfläche für Klebstoff A für Zugnormalspannungen

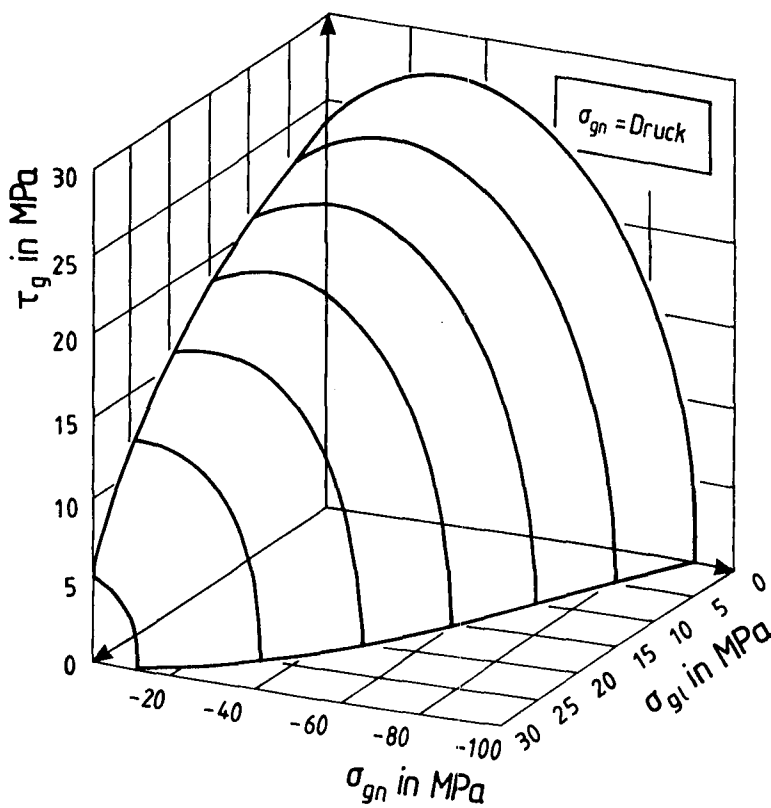


Bild 5.34: Bruchgrenzfläche für Klebstoff A für Drucknormalspannungen

## 6. KLEBVERBINDUNGEN UNTER DYNAMISCHER BEANSPRUCHUNG

### 6.1 Allgemein

Während es auf dem Gebiet der Spannungsberechnung und Tragfähigkeitsanalyse von Klebeverbindungen unter statischer Beanspruchung eine Vielzahl von Veröffentlichungen gibt, existieren zum Thema des dynamischen Tragverhaltens und der Tragfähigkeitsbestimmung relativ wenige Angaben in der Literatur. Dabei werden an geklebte Konstruktionen, z.B. in der Luft- und Raumfahrt extreme Anforderungen bezüglich ihrer Festigkeit unter dynamischen Beanspruchungen gestellt. Die Dimensionierung derartiger Verbindungen erfolgt entweder auf Grundlage von Bauteilversuchen, oder auf Basis von Grundversuchen an kleinen Probekörpern mit anschließender Übertragung der Ergebnisse auf das Bauteil, s. /16/. Bevor auf die eigenen dynamischen Versuche eingegangen wird, wird im folgenden ein kurzer Überblick über den Kenntnisstand auf dem Gebiet der geklebten Verbindungen unter dynamischer Belastung gegeben.

### 6.2 Stahl-Stahl-Klebung

Der Einfluß einer dynamischen Beanspruchung auf die Tragfähigkeit einer geklebten Verbindung hängt vor allem von den Parametern Geometrie und Steifigkeit der Fügeteile, Art der Oberflächenvorbehandlung, Belastungshöhe, Temperatur, und von der Prüffrequenz ab. Um den Vergleich mit der statischen Kurzzeitfestigkeit zu ermöglichen, wird der für die dynamische Festigkeitsuntersuchung verwendete Versuchskörper identisch zu dem der statischen Versuche gewählt /4/. Der Fügeteilvorbehandlung kommt bei Metallklebungen eine große Bedeutung zu, da infolge der Kerbwirkung bei rauen Oberflächen, z.B. durch Sandstrahlen, die Gefahr der Reduzierung der Schwingfestigkeit besteht /16/. Ebenfalls verschlechternd auf die Schwingfestigkeit wirken sich Spannungskonzentrationen infolge der konstruktiven Gestaltung des Bauteiles aus. Der Einfluß einer derartigen inhomogenen Spannungsverteilung kann verschmiert durch eine Kerbwirkungszahl berücksichtigt werden /51/, die als das Verhältnis der Dauerschwingfestigkeit eines ungekerbten Probe zu der Dauerschwingfestigkeit eines gekerbten Bauteiles definiert ist. Eine Verbesserung des Schwingverhaltens kann somit erreicht werden, wenn es gelingt, den Spannungszustand in der Klebfuge zu vergleichmäßigen. Eine bestimmende Größe nimmt daher das

Verformungsverhalten der Klebschicht und damit die Fähigkeit des Klebstoffes zum Ausgleich von Spannungsspitzen über die Klebelänge ein. Als Bruchursache für Klebverbindungen unter dynamischer Belastung wird in der Literatur das Erschöpfen von Verformungsreserven innerhalb des Molekülverbandes festgestellt, s. z.B. /16/, /23/. Bei gleicher Kohäsionsfestigkeit besitzt ein Klebstoff mit ausgeprägten elastisch-plastischen Verformungseigenschaften eine höhere Schwingfestigkeit, als ein spröder Klebstoff. Mit steigender Frequenz werden zunehmend zeitabhängige Verformungsvorgänge unterdrückt, so daß die mechanischen Eigenschaften ebenfalls geschwindigkeitsabhängig sind.

Matting und Draugelates /56/ führten eine Vielzahl von dynamischen Versuchen an einschnittig überlappten Klebverbindungen mit unterschiedlichen Klebstoffen durch. Die Ergebnisse wurden in der für Metalle üblichen Darstellung nach Wöhler im S-N- Diagramm dargestellt. In log-log-Maßstab lassen sich die Ergebnisse als Gerade für den Zeitfestigkeitsbereich angeben. Die Existenz einer Dauerfestigkeit konnte jedoch nicht bestätigt werden. Marceau et al. /57/ stellten eine Frequenzabhängigkeit der erreichten Lastspielzahlen fest. Bei niedrigen Prüffrequenzen ( $f=2,2 \cdot 10^4$  Hz) wurde eine ausgeprägte Reduzierung der Zeitfestigkeit im Vergleich zu hohen Frequenzen ( $f = 30$  Hz) festgestellt. Ursache ist nach /57/ ein Wechsel in der Bruchart. Trat bei hohen Frequenzen das Versagen infolge von Materialermüdung und Rißwachstum im Klebstoff im grenzschichtnahen Bereich auf, wurde bei den niedrigen Frequenzen der Bruch in Klebstoffmitte als Folge eines Kriechbruches registriert.

Allen et al. /58/ untersuchten das dynamische Tragverhalten und das Rißwachstum in einschnittig überlappten Aluminium-Klebverbindungen unter dynamischer Beanspruchung. Sie postulierten die Existenz einer Dauerfestigkeitsgrenze des Klebstoffes. Eine Belastung unterhalb dieses Niveaus führt zu keiner Schädigung der Klebschicht. Die Höhe dieser Festigkeitsgrenze wurde mit Hilfe von statischen Kurzzeitversuchen zur Bestimmung der Restfestigkeit nach vorgängiger dynamischer Beanspruchung ermittelt. Belastungen unterhalb der Dauerfestigkeit erbrachten die ungekürzte Kurzzeitfestigkeit, Belastungen oberhalb reduzierten die Zugfestigkeit. Die Dauerfestigkeit des Klebstoffes wurde zu ca. 35% der statischen Kurzzeitzugfestigkeit bestimmt.

In keiner der zuvor genannten Arbeiten wurden die im Bauwesen verwendeten



hochgefüllten Epoxidharzklebstoffe nach Tab. 5.1 verwendet. Mays berichtet in /59/ über Untersuchungen an dynamisch belasteten zweischnittigen Metallklebverbindungen mit einem kalthärtenden gefülltem Epoxidharzklebstoff. Parameter der Untersuchungen waren neben der Oberspannung in Form einer mittleren Schubspannung die Temperatur und Feuchtigkeit. Nach Bild 6.1 werden Grenzzlinien der ertragbaren Spannung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl angegeben.

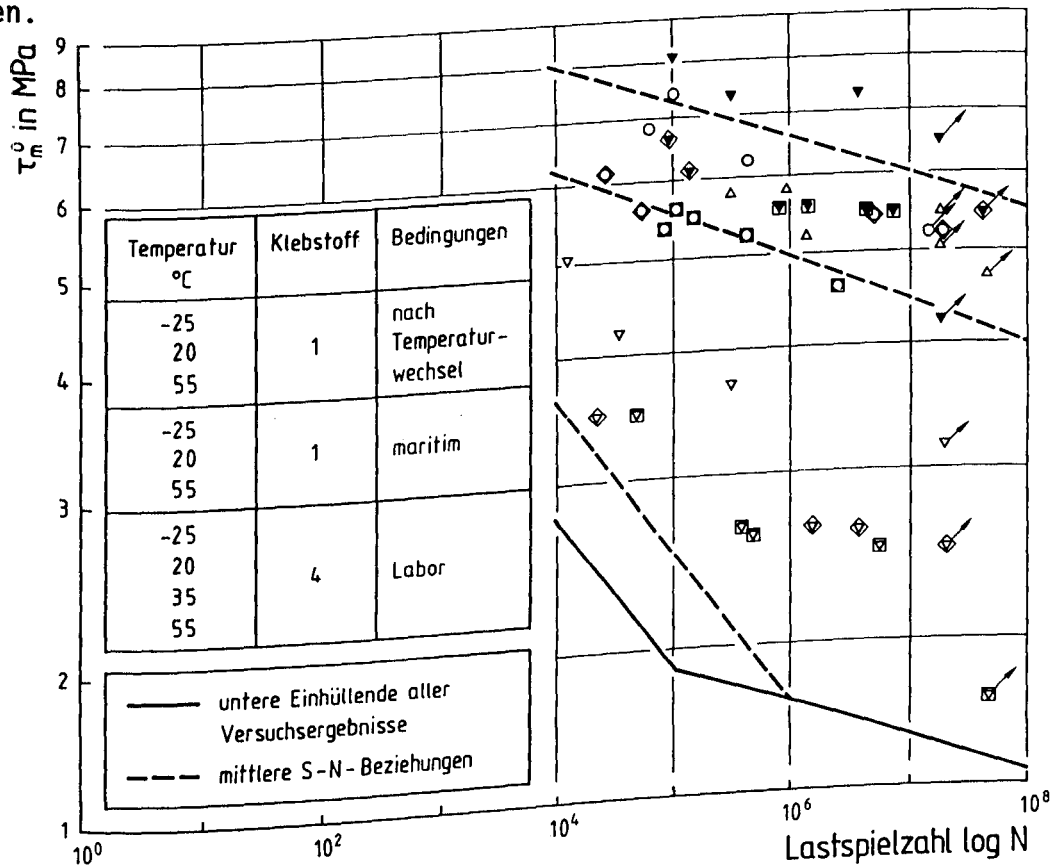


Bild 6.1: Dynamische Versuche an zweischnittigen Metallklebverbindungen,  $R \approx 0,1$ , nach /59/

### 6.3 Stahl-Beton-Klebung

Während auf dem Gebiet der Untersuchungen zur statischen Tragfähigkeit laschenverstärkter Biege- und Zugtragglieder umfangreiche theoretische und praktische Arbeiten vorgenommen worden sind, existieren nur wenig Angaben in der Literatur zum dynamischen Tragverhalten. Experimentelle Untersuchungen hatten oftmals das Ziel, für einen konkreten Anwendungsfall mit definierten Belastungsgrenzen die Eignung der Methode der geklebten Bewehrung zu überprüfen. Grenzzustände der Tragfähigkeit wurden dabei nur vereinzelt untersucht. Parameterstudien, detaillierte Angaben zum Schädigungs-

mechanismus fehlen weitgehend, Modelle zur Vorhersage der Schädigung fehlen völlig.

Umfangreiche Versuche an laschenverstärkten Biegetraggliedern wurden von Rostásy und Hankers /52/ mit dem Ziel durchgeführt, einen Einblick in den Schädigungsmechanismus der geklebten Bewehrung unter dynamischer Beanspruchung zu erhalten. Versuchsparameter waren die Laschengeometrie sowie die Höhe der Belastung. Bild 6.2 zeigt die bei dynamischen Versuchen beobachteten Brucharten. Neben dem Versagen des Laschenverbunds

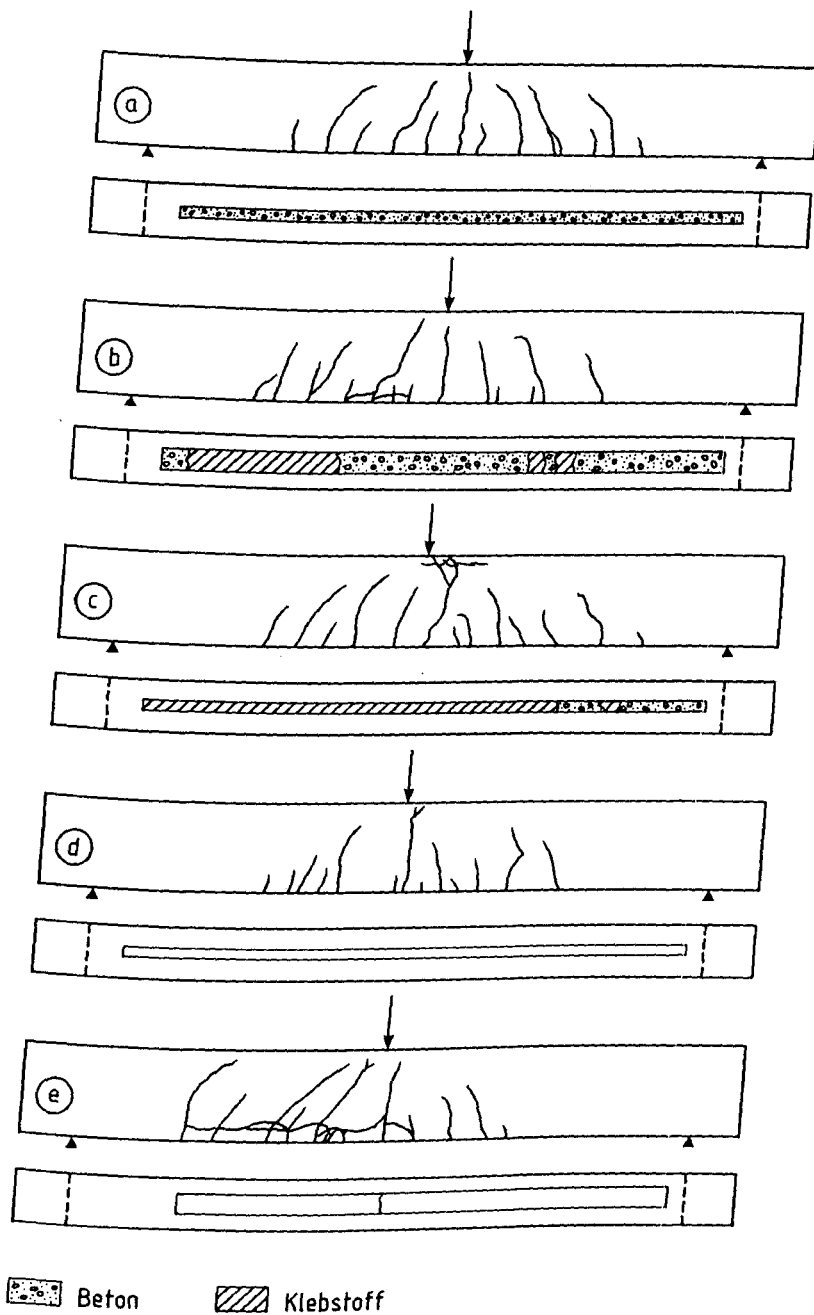


Bild 6.2: Brucharten bei dynamischen Laschenversuchen

im Beton traten auch Klebstoffbrüche, in Bild 6.2 schraffiert dargestellt, sowie Ermüdungsbrüche der Lasche auf. Kommt es zum Versagen des Laschenverbundes können zwei Versagensarten auftreten: Betonbruch wenige Millimeter bis Zentimeter oberhalb der Lasche oder Bruch im Klebstoff. Die Phänomenologie des Versagens ist nur unzureichend untersucht worden, so daß eine Abgrenzung der Versagensarten gegeneinander bisher nicht möglich ist.

Ziel eines weiteren, zur Zeit laufenden und von der DFG geförderten Forschungsvorhabens ist die Modellierung des Verbundes Stahllasche-Beton unter dynamischer Beanspruchung /50/.

#### 6.4 Beton-Beton-Klebung

Umfangreiche dynamische Versuche an epoxidharzverklebten Betonprismen wurden von Rehm und Franke /24/ durchgeführt. Versuchsparameter waren neben der Höhe der Belastung die Lagerungskonditionen vor Beginn der dynamischen Belastungsphase und die Prüftemperatur. Bild 6.3 zeigt exemplarisch eine Belastungsphase und die Prüftemperatur. Bei allen Versuchskörpern, die im

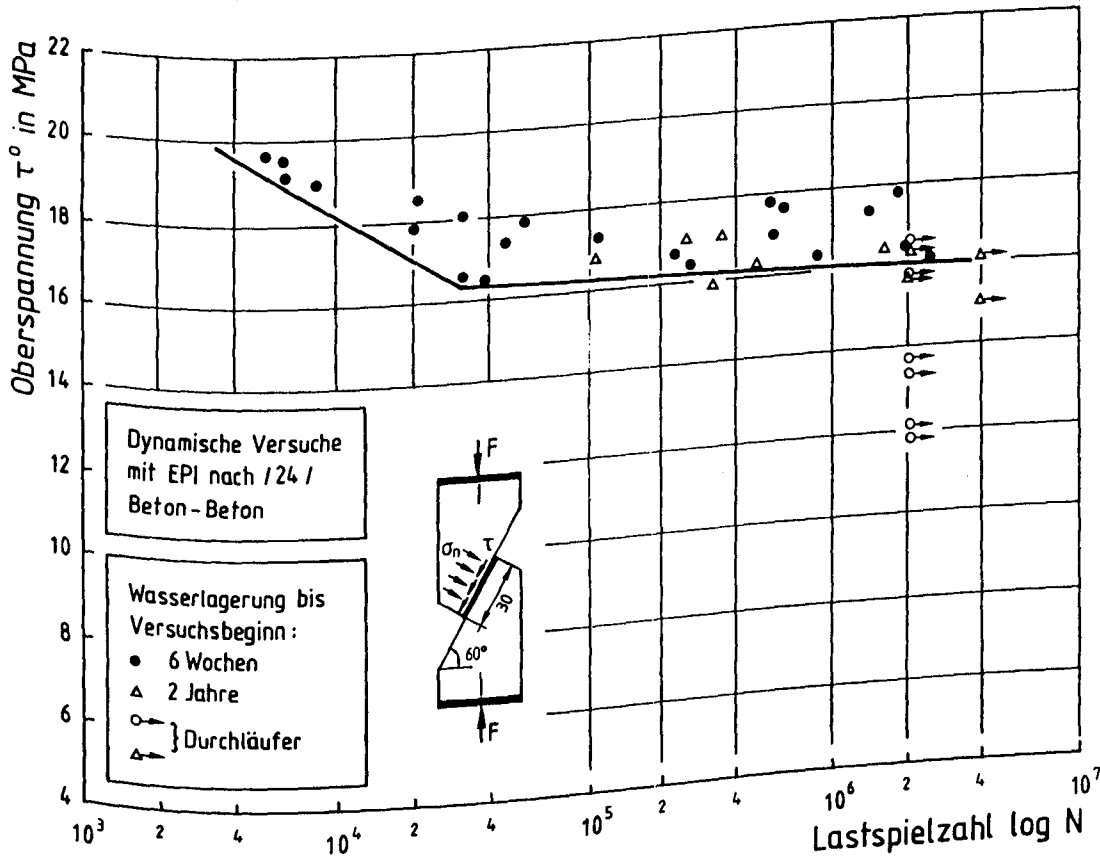


Bild 6.3: Dynamische Versuche mit epoxidharzverklebten Betonprismen, nach /24/

dynamischen Versuch versagten, trat der Bruch an der Grenzfläche Beton-Klebstoff als Adhäsionsbruch auf. Die Schwingfestigkeit nach zwei Millionen Lastwechseln wird mit 55 % der Kurzzeit-Schub-Druckfestigkeit angegeben. In /24/ wird vorgeschlagen, eine Reduzierung der Tragfähigkeit infolge einer dynamischen Belastungsphase durch die Reduzierung des Adhäsionsanteiles der Bruchbedingung vorzunehmen. Durch Einführung eines Reduktionsfaktors  $k_{dyn}$  wird Gl.(3.10) zu

(6.2)

$$\tau_u = k_{dyn} \beta_s + \mu \sigma_n \cdot$$

In der  $\tau$ - $\sigma$ -Darstellung entspricht dies einer Parallelverschiebung der Coulombschen Gerade.

Eine zusammenfassende Betrachtung bisher durchgeführter Untersuchungen über das Tragverhalten geklebter Beton-Beton-Verbindungen enthält die Literaturstudie in /24/.

## 7. VERSUCHE ZUM TRAGVERHALTEN DER KLEBEFUGE UNTER DYNAMISCHER BEANSPRUCHUNG

### 7.1 Versuchsbeschreibung

Zur Beschreibung des Einflusses einer dynamischen Beanspruchung auf die Tragfähigkeit einer epoxidharzverklebten Fuge wurden die in Kapt. 5 beschriebenen Versuchskörper verwendet. Versuchsaufbau und Meßeinrichtung entsprachen denen der statischen Versuche. Die dynamischen Versuche wurden mit der Pressenkraft als Regelgröße kraftgeregelt durchgeführt. Gemessen wurden mit der in Kapt. 5.3 beschriebenen Meßeinrichtung die Verschiebungen  $s$  in und die Verformungen  $v$  normal zur Fugenebene. Die Prüffrequenz betrug bei allen Versuchen einheitlich 2 Hz. Parameter war die Höhe der Oberlast bei konstanter Unterlast. Schwerpunktmäßig wurde Klebstoff A verwendet, mit Klebstoff B wurden nur Tastversuche an 60°-Versuchskörpern im Zugschwellbereich durchgeführt. An Versuchskörpern, die während der dynamischen Belastungsphase nicht versagten, wurde die statische Resttragfähigkeit bestimmt, um Aussagen über den Grad der Schädigung zu erhalten. Bei einigen Versuchen wurde versucht, Aussagen über die progressive Schädigung der Klebschicht unter dynamischer Belastung und die damit verbundene Verformungszunahme mit Hilfe von normal zur Klebefugenrichtung orientierten Kettendehnmeßstreifen zu bestimmen.

## 7.2 Versuchsauswertung

### 7.2.1 Darstellung der erreichten Lastspielzahlen im Wöhler-Diagramm

Die Auswertung der Zugschwellversuche erfolgt durch Darstellung der erreichten Lastspielzahlen in Abhängigkeit von der Oberlast im Wöhler-Diagramm. Tabelle A3 enthält die Versuchsergebnisse. Da die statischen Versuche gezeigt haben, daß die Orientierung der Fuge zur Belastungsrichtung kaum einen Einfluß auf die Tragfähigkeit besitzt, erfolgt eine gemeinsame Auswertung aller Versuchsergebnisse, unabhängig vom Fugeneigungswinkel.

Bild 7.1 zeigt die Ergebnisse der dynamischen Zugschwellversuche. Die je Belastungsniveau durchgeführten Versuche zeigen eine große Streubreite hinsichtlich der Bruchlastspielzahlen. Als Auswerteverfahren wird die

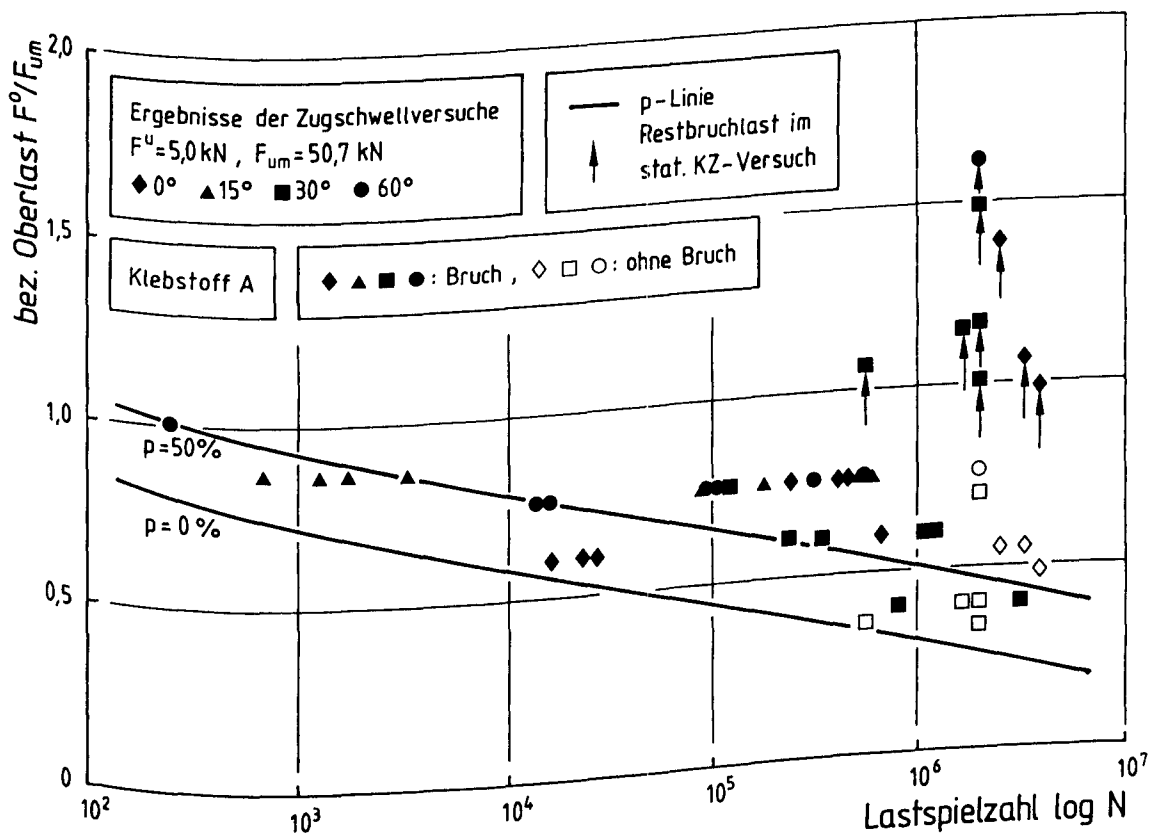


Bild 7.1: Ergebnisse der Zugschwellversuche, Klebstoff A

$\arcsin\sqrt{p}$ -Transformation angewendet, mit der S-N-Linien bestimmter Bruchwahrscheinlichkeit  $p$  angegeben werden können. Eine Beschreibung des Verfahrens ist z.B. in /53/ oder /54/ zu finden. Die Zuverlässigkeit dieser Auswertemethode steigt mit der Zahl der Beanspruchungsstufen und der je Stufe durchgeführten Versuchszahl. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, daß die Varianz der Transformationsgröße  $x=\arcsin\sqrt{p}$  mit steigender Anzahl der Versuche je Stufe einem konstanten Wert zustrebt, so daß bereits mit einer geringen Versuchszahl relativ hohe Vorhersagegenauigkeiten möglich sind. Mit der  $\arcsin\sqrt{p}$ -Transformation ist es möglich, eine Aussage über die Versagenswahrscheinlichkeiten  $p=0$  und  $p=100\%$  zu gewinnen, da die Verteilungsfunktion an diesen Grenzen Asymptoten besitzt, s. Bild 7.2.

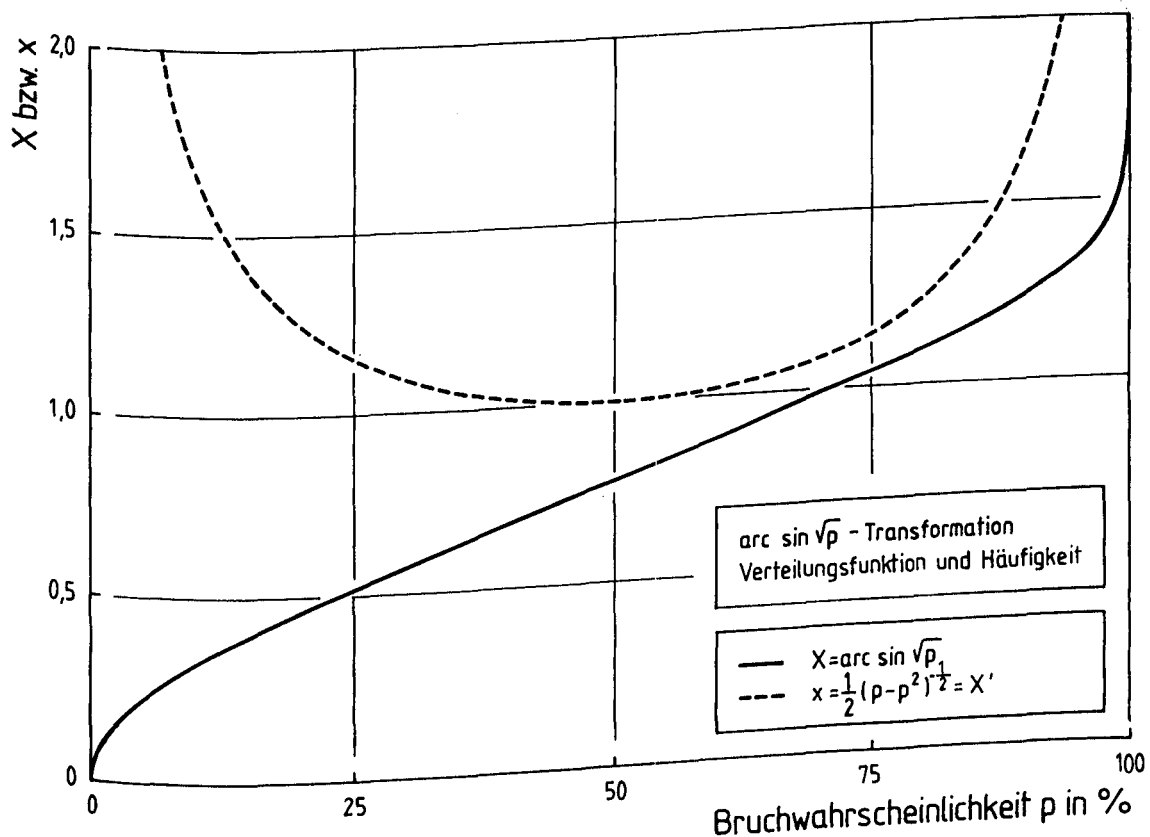


Bild 7.2: Verteilungs- und Häufigkeitsfunktion der  $\arcsin\sqrt{p}$ -Transformation

Die Auswertung erfolgt getrennt für den Zeitfestigkeitsbereich und für den Bereich mit ertragenen Lastwechseln größer als zwei Millionen. Im Anhang A5 ist die Auswertung der Versuchsergebnisse beschrieben.

Die in Bild 7.1 angegebenen Linien geben die  $F^0$ -N-Linien für  $p=0\%$  und  $p=50\%$  Bruchwahrscheinlichkeit wieder. Sie wurden durch lineare Regression der mit der  $\arcsin\sqrt{p}$ -Transformation bestimmten  $F^0$ -logN-Werte ermittelt. Es ergeben sich die Funktionen nach Gl.(7.1) und (7.2):

$$p = 0\% : F^0/F_{um} = -0,136 \cdot \log N + 1,11 \quad (7.1)$$

$$p = 50\% : F^0/F_{um} = -0,136 \cdot \log N + 1,32 \quad (7.2)$$

Die 0% - Linie kann auch als eine sichere untere Einhüllende der Versuchsergebnisse aufgefaßt werden, unterhalb derer mit keinem dynamischen Klebschichtversagen zu rechnen ist. Die Angabe einer Dauerschwingfestigkeit in Analogie zum Festigkeitsverhalten von Stahl unter dynamischen Beanspruchungen bei  $N=2 \cdot 10^6$  Lastwechseln erscheint aufgrund der relativ geringen Versuchsanzahl nicht gerechtfertigt und auch nach den Angaben in der Literatur unvereinbar. In /4/ und /55/ wird ein Wert für die Dauerschwingfestigkeit von Metallklebungen bei  $N=2 \cdot 10^7$  Lastwechseln im Wöhler Schaubild definiert. Da aber bei den auf dem niedrigsten Lastniveau geprüften Versuchskörpern kein Versagen bei  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastwechsel auftrat und im anschließenden statischen Zugversuch die ermittelte Restbruchlast die Kurzzeitbruchlast erreicht, bzw. überschritt, ist von keiner Schädigung der Klebschicht unterhalb dieses Niveaus bis  $N=2 \cdot 10^6$  Lastwechseln auszugehen.

### 7.2.2 Einfluß einer Druckbeanspruchung

Der Einfluß einer Druckschwellbelastung auf die Tragfähigkeit einer epoxidharzverklebten Fuge wurde nur stichprobenartig untersucht. Tab. A6 enthält die Ergebnisse. Eine statistische Auswertung der dynamischen Druckversuche ist aufgrund der geringen Versuchsanzahl nicht ratsam. Unter der angelegten Oberlast  $F^0$ , bezogen auf den jeweiligen Mittelwert der Bruchlast  $F_{um}$  im statischen Kurzzeitdruckversuch liegen die erreichten Lastspielzahlen im Streubereich der Ergebnisse der dynamischen Zugversuche, s. Bild 7.3. Der Schädigungsgrad wird daher im folgenden als unabhängig von der Art der Belastung angesehen und durch die Größe der Oberlast bestimmt.

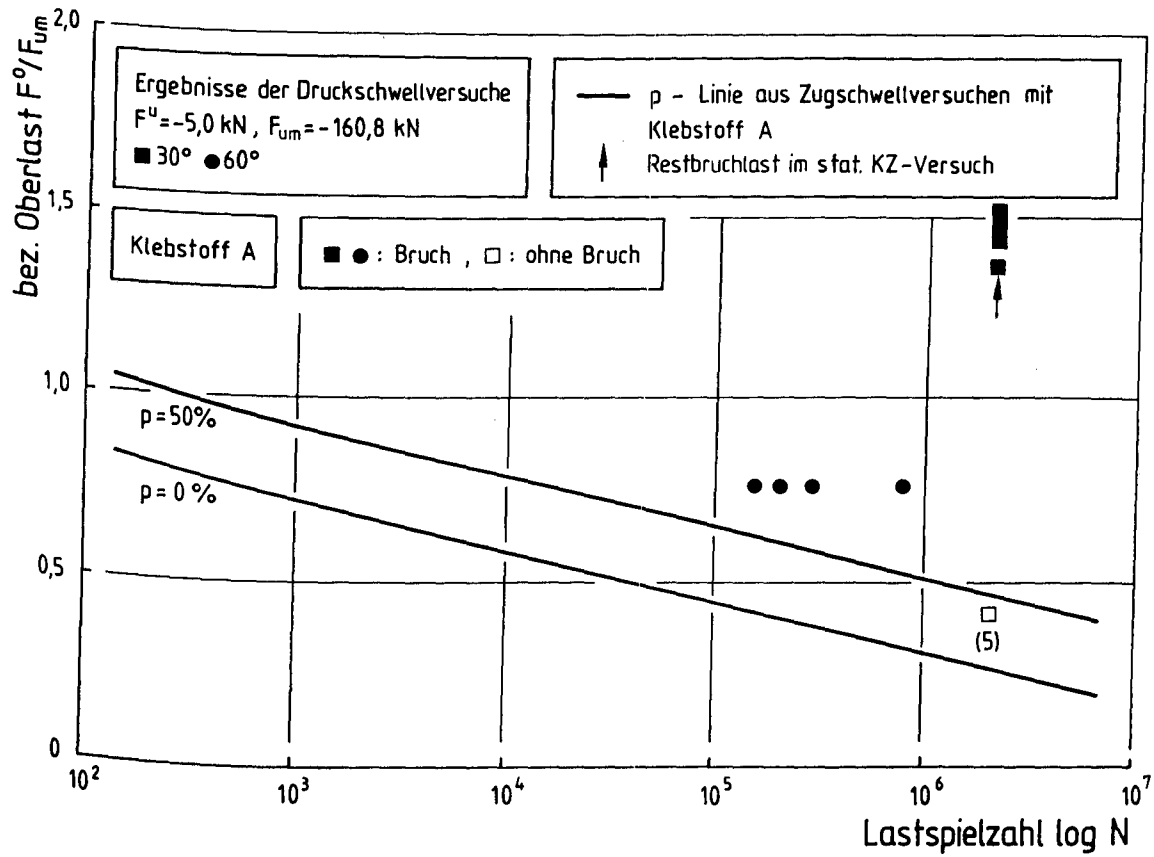


Bild 7.3: Ergebnisse der Druckschwellversuche, Klebstoff A

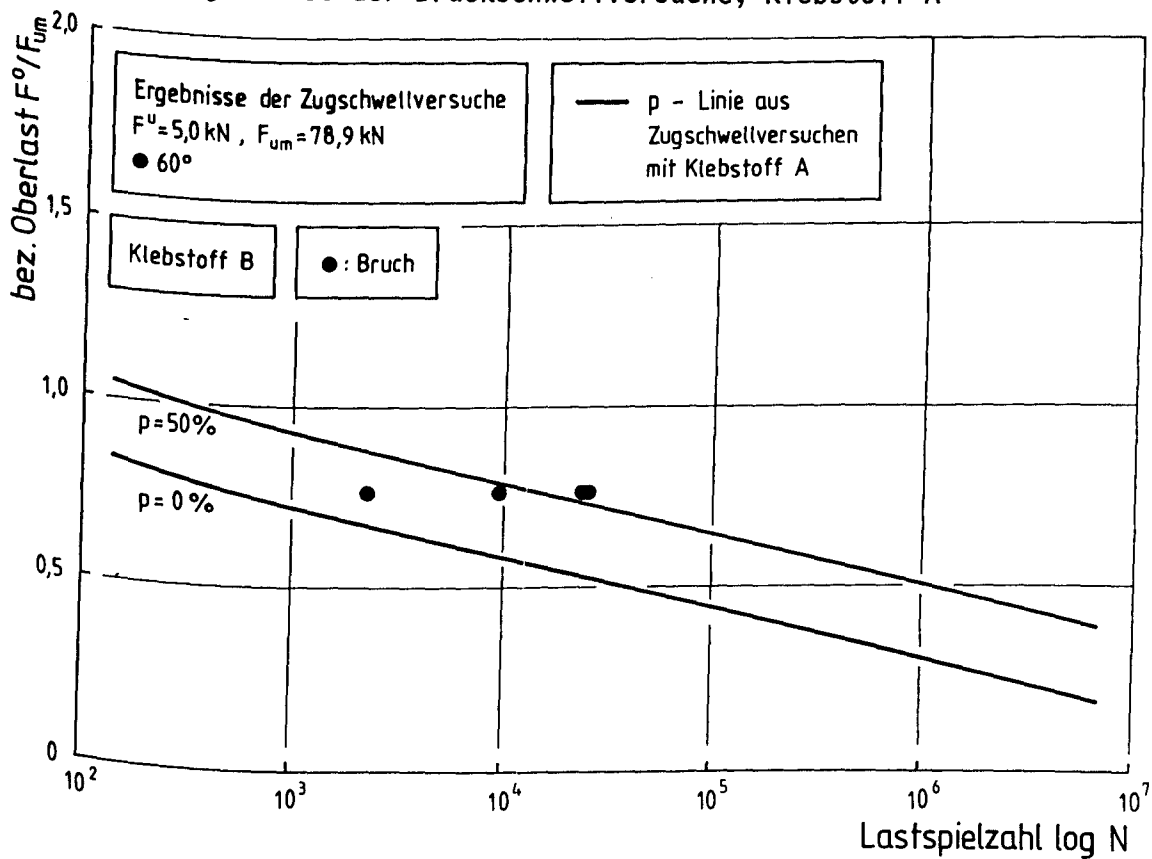


Bild 7.4: Ergebnisse der Zugschwellversuche, Klebstoff B



### 7.2.3 Einfluß der Klebstoffart

Mit dem Klebstoff B wurden am 60°-Versuchskörper vier dynamische Zugversuche nach Tab. A4 mit einem hohen Belastungsgrad durchgeführt. Mit einer Oberlast von  $F^0=60,0$  kN, entsprechend  $0,76 \cdot F_{um}$  wurden Lastspielzahlen erreicht, die im Streubereich der Bruchwahrscheinlichkeitslinien der Ergebnisse mit Klebstoff A liegen, s. Bild 7.4.

### 7.3 Erweiterung des Bruchkriteriums auf dynamische Beanspruchung

Das Bruchkriterium für statische Beanspruchung soll auf dynamische Beanspruchung erweitert werden. Die dynamischen Zug- und Druckschwellversuche haben gezeigt, daß der Schädigungsgrad vom Verhältnis  $F^0/F_{um}$  abhängt. Für definierte Grenzlasterlastspielzahlen läßt sich die ertragbare Belastung  $F^0/F_{um}$  nach Bild 7.1 in Abhängigkeit von der Bruchwahrscheinlichkeit angeben. Für die folgenden Betrachtungen wird ein lastspielzahlabhängiger Schädigungsfaktor  $s_{dyn}$  nach Gl. (7.3) eingeführt, der sowohl für Zug- als auch für Druckschwellbelastung Gültigkeit besitzen soll.

$$s_{dyn} = f(N, p) = F^0/F_{um} = -0,136 \cdot \log N + k \quad (7.3)$$

mit  $k = f(p)$ . Für  $p=0\%$  beträgt  $k = 1,11$ , für  $p=50\%$  ist  $k = 1,32$ , siehe auch Gl.(7.1) und (7.2).

Durch Reduktion der einachsigen Druck- und Zugfestigkeit des Klebstoffes infolge Multiplikation mit  $s_{dyn}$  kann die lastspielzahlabhängige dynamische Festigkeit des Klebstoffes unter Vorgabe eines Wertes für die Bruchwahrscheinlichkeit angegeben werden. Bild 7.5 zeigt das Bruchkriterium des Klebstoffes A für statische Beanspruchung und dessen Modifikation infolge einer dynamischen Belastung mit  $N=2 \cdot 10^6$  Lastwechseln und einer Bruchwahrscheinlichkeit von 0%. Nach Gl.(7.3) ergibt sich ein Reduktionsfaktor von  $s_{dyn}=0,25$ . Die Einhüllende der einachsigen Spannungskreise in Parabelform nach Gl.(5.6) kann gemäß Gl. (7.4) bestimmt werden.

$$\left( \frac{\tau}{f_{gc}'} \right)^2 = \kappa \left[ 2 - 2 \sqrt{1 + \frac{1}{\kappa} + \frac{1}{\kappa}} \right] \left( \kappa - \frac{\sigma_{gn}}{f_{gc}'} \right) \quad (7.4)$$

mit

$$\kappa = \frac{f_{gt}}{f_{gc}}$$

und

$$f_{gc}' = f_{gc} \cdot s_{dyn}, \text{ bzw. } f_{gt}' = f_{gt} \cdot s_{dyn}$$

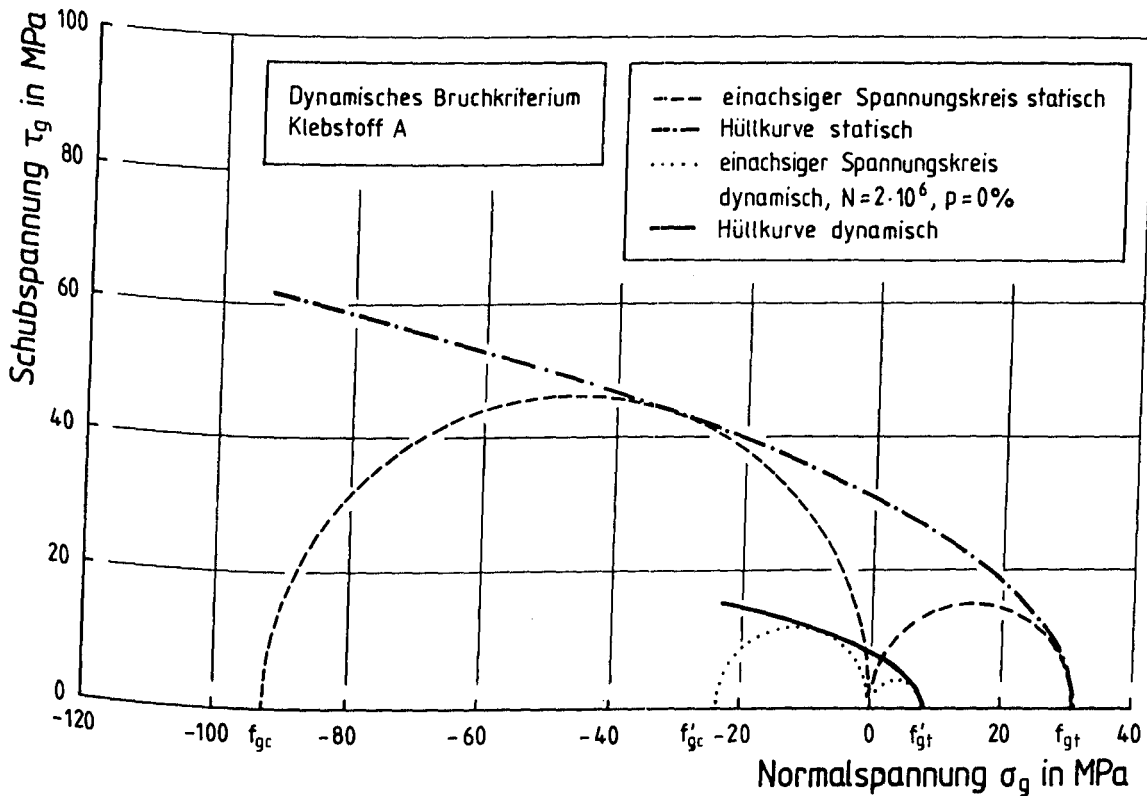


Bild 7.5: Dynamisches Bruchkriterium für Klebstoff A

Welche Auswirkung eine dynamische Belastung auf die ertragbare  $\tau_g$ - $\sigma_{gn}$  - Kombination in Abhängigkeit von der Längsspannung  $\sigma_{gl}$  besitzt, kann analog zu Gleichung (5.8) mit Gl. (7.5) formuliert werden.

$$\tau = \sqrt{b' f_{gt}' + \sigma_{gn} \sigma_{gl} - 0,25(b' + \sigma_{gn} + \sigma_{gl})^2} \quad (7.5)$$

mit  $b' = b \cdot s_{dyn}$

Bild 7.5 zeigt die Grenzfläche für  $N=2 \cdot 10^6$  Lastwechsel,  $p=0\%$  und  $s_{dyn}=0,25$ . Eine anschauliche Darstellung zum Einfluß einer dynamischen Belastung bis  $2 \cdot 10^6$  Lastwechsel auf die ertragbare Spannungscombination zeigen die Bilder 7.6 und 7.7 für Druck- und Zugnormalspannungen.

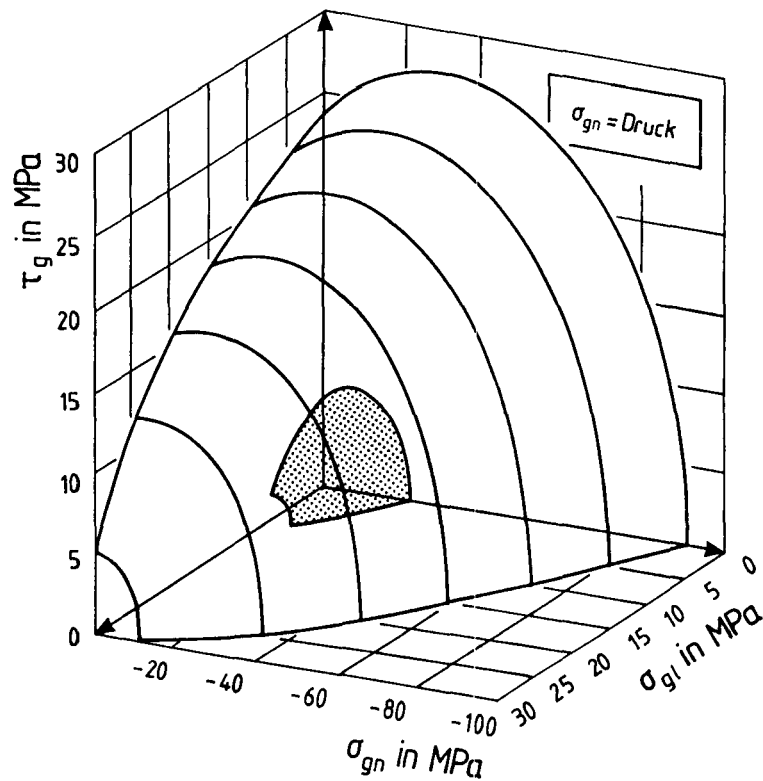


Bild 7.6: Tragfähigkeitsreduzierung infolge einer dynamischen Belastung bis  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastwechseln und einer Drucknormalspannung, ( $R \approx 0,1$ )

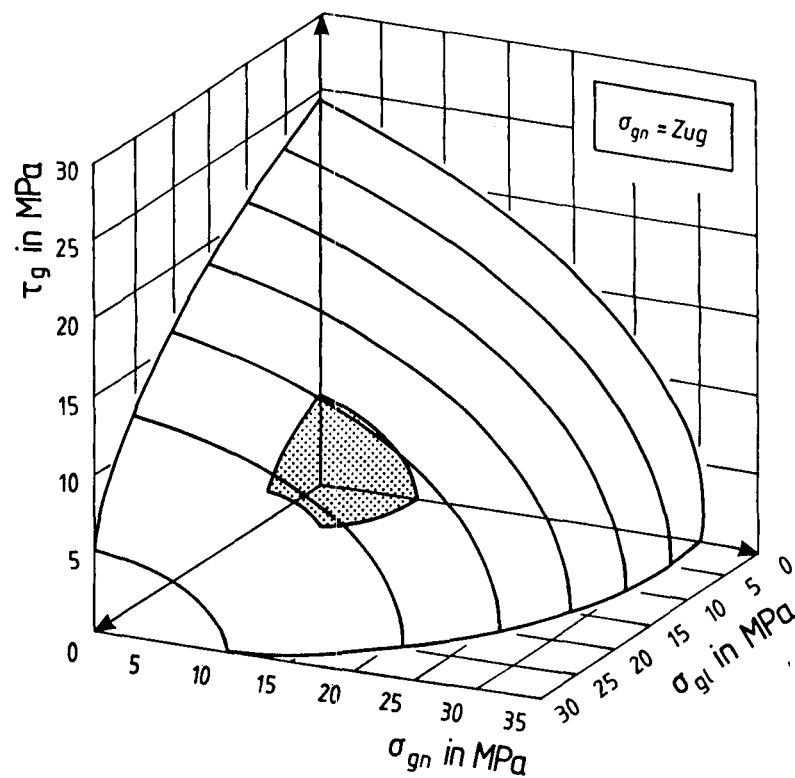


Bild 7.7: Tragfähigkeitsreduzierung infolge einer dynamischen Belastung bis  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastwechseln und einer Zugnormalspannung, ( $R \approx 0,1$ )

## 8. SCHÄDIGUNGSPROZESS UNTER DYNAMISCHER BEANSPRUCHUNG

### 8.1 Verformung in Abhängigkeit von Belastung und Lastspielzahl

Die Auswertung der dynamischen Versuche gemäß Kap. 7 berücksichtigt nur die Grenztragfähigkeit der geprüften Versuchskörper als Resultat eines progressiven Rißwachstums, beschreibt jedoch nicht die fortschreitende Schädigung. Der Schädigungsprozeß kann z.B. in Form der gemessenen Verformungen sichtbar werden.

Den qualitativen Verlauf der Klebschichtverformung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl zeigt Bild 8.1. Die nach Erreichen der Verformung  $v^0$  bei Oberlast beschleunigte Verformung zu Beginn des Versuches (Bereich I) weist auf ein primäres Fließen durch Lösen von Nebenverbindungen und Umlagern von Kettenmolekülen hin /60/. Während des darauffolgenden Zeitraumes (Bereich II) beginnt die Bildung von Initialrissen. Als Rißursprung gelten nach /60/ Fehlstellen und damit verbunden lokale Spannungsspitzen. Das Wachstum dieser Initialrisse führt zu einer erhöhten Beanspruchung des Restquerschnittes und verursacht größere Verformungen (Bereich III), die den Bruch der Verbindung einleiten.

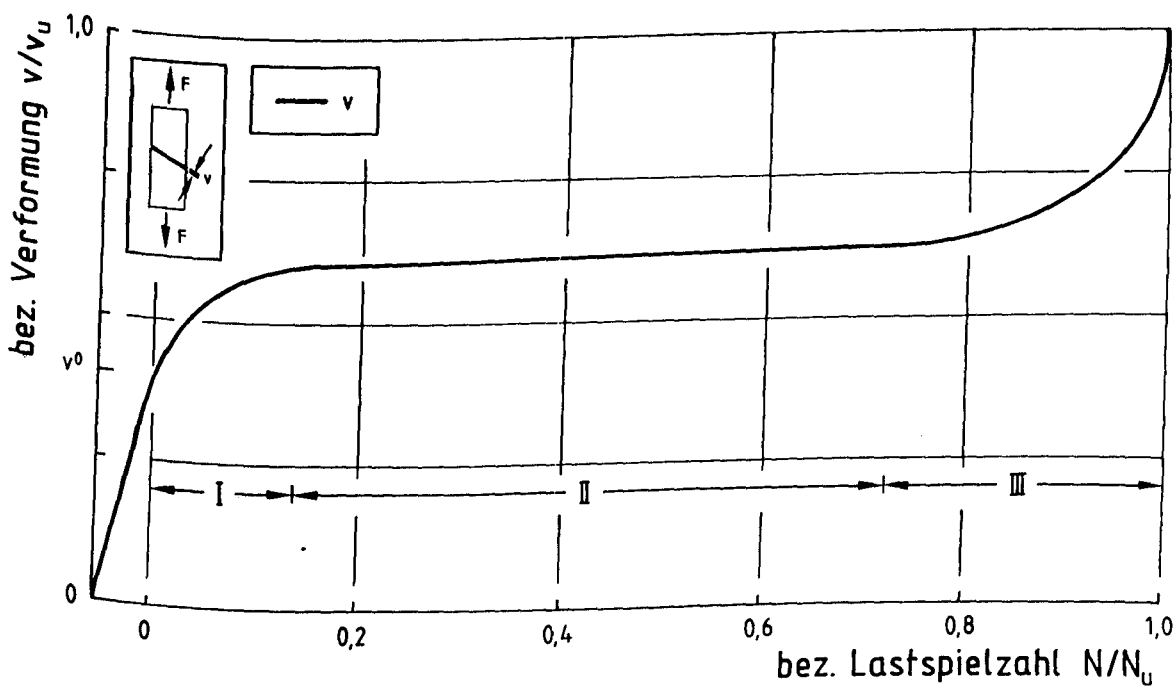


Bild 8.1: Qualitative Darstellung der Klebschichtverformung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl

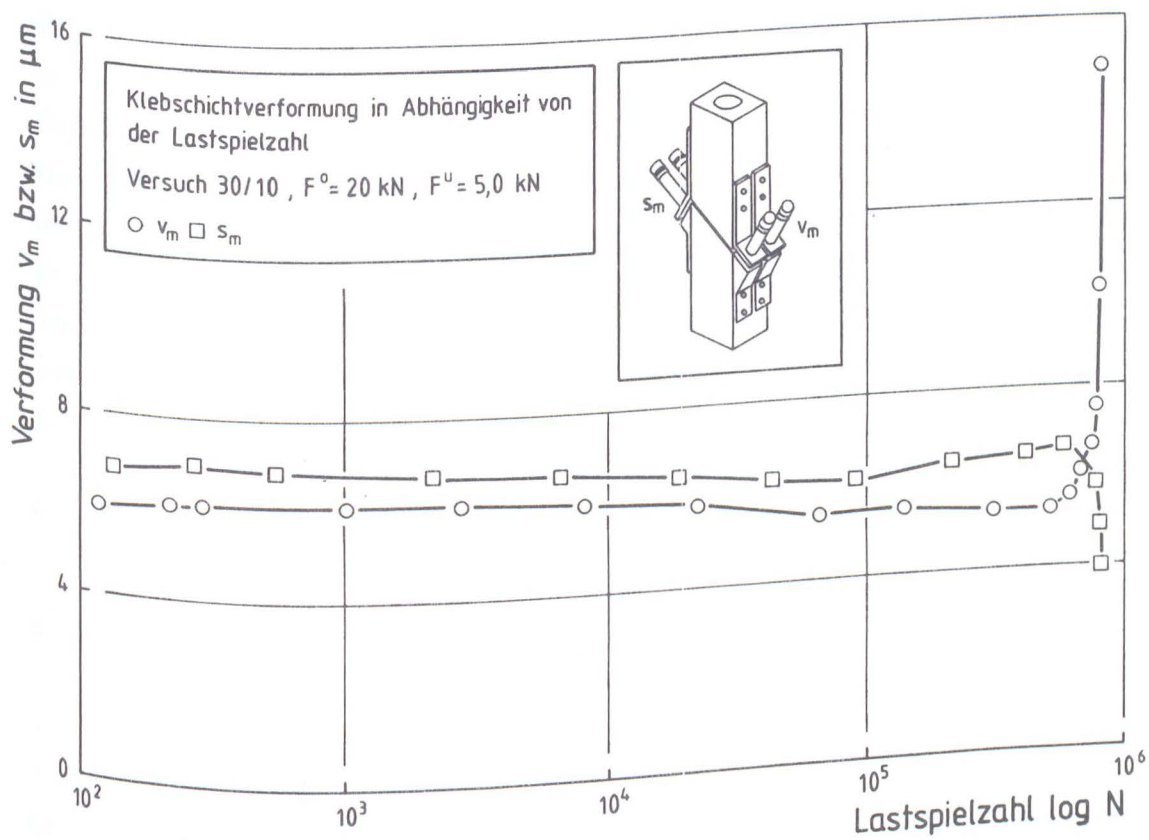


Bild 8.2: Gemessene Klebschichtverformung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl, Versuch 30/10



A



B

Bild 8.3: Bruchfläche des dynamischen Versuches 30/10

Bild 8.2 zeigt exemplarisch den Verlauf der gemessenen Verformungen normal zur Klebefläche  $v_m$  und in Klebefugenrichtung  $s_m$  für einen dynamischen Zugversuch mit dem 30°-Versuchskörper Nr.10 (30/10) als Mittelwerte aus je zwei Wegaufnehmermessungen. Das Anfahren der Oberlast ist nicht dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der Bereich II mit nahezu konstanter Verformung und der Bereich III mit progressiv wachsenden Verformungen  $v_m$ , bzw. abnehmender Verschiebung  $s_m$ . Der Blick auf die Bruchfläche zeigt zwei Zonen, die auf ein dynamisches Rißwachstum zum einen und zum anderen auf eine Restbruchfläche hindeuten, s. Bild 8.3.

## 8.2 Bruchmechanisches Konzept

### 8.2.1 Allgemein

Die für das Laschenkleben verwendeten Klebstoffe sind spröde und weisen im erhärteten Zustand Inhomogenitäten, vor allem in Form von Luftporen auf. Mit Hilfe der Bruchmechanik kann das Verhalten eines fehlstellenbehafteten spröden Werkstoffes unter Belastung beschrieben werden. Im folgenden soll die Anwendbarkeit der linear-elastischen Bruchmechanik überprüft werden. Ziel ist die Angabe von Grenzwerten der Belastung oder Fehlergrößen zur Vorhersage des Beginns eines instabilen Rißwachstums bei zunächst statischer Belastung. Eine Erweiterung des Ansatzes für dynamische Belastung erfolgt in Kap. 8.2.4. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens können nur die Grundlagen für eine bruchmechanische Beurteilung der Tragfähigkeit der für das Laschenkleben verwendeten Epoxidharzklebstoffe gegeben werden. Die Durchführung von Parameterstudien und hieraus resultierende Bemessungskonzepte bedürfen noch weitergehender Forschung.

Es wird ein Wert der Bruchzähigkeit bestimmt, der, vergleichbar der Streckgrenze bei zähen Werkstoffen, das instabile Rißwachstum beschreibt. Die Bruch- oder Rißzähigkeit kann durch die Einführung eines Spannungsintensitätsfaktors  $k_C$  nach Gl.(8.1) definiert werden.

$$k_C = \sigma \sqrt{a \cdot \pi} \quad (8.1)$$

Die analytische Bestimmung von  $k_C$  erfordert eine Spannungsanalyse des Zustandes an der Rißspitze, was nur mit FE-Rechnungen oder in Ausnahmefällen analytisch möglich ist. Andererseits kann die Bruchzähigkeit über eine Energiebetrachtung experimentell bestimmt werden. Dieser Weg wird

nachfolgend beschritten.

Der für eine RiBerweiterung benötigte Energiebedarf muß bei konstanter äußerer Belastung von der freiwerdenden elastischen Energie der sich entspannenden RiBufer zur Verfügung gestellt werden. Von Irvin , z.B. nach /62/, wurde die Beziehung

$$\frac{d(\Delta U_e)}{2da} = G \quad (8.2)$$

zur Formulierung einer RiBerweiterungskraft  $G$  herangezogen, mit  $d(\Delta U_e)$  als der Änderung der elastischen Energie bei RiBausbreitung und mit  $da$  als Änderung der RiBlänge. Zwischen  $k$  und  $G$  bestehen die folgenden Beziehungen

$$G = \frac{k^2}{E} \cdot (1-\nu^2) \quad (\text{ebener Verformungszustand}) \quad (8.3)$$

bzw.

$$G = \frac{k^2}{E} \quad (\text{ebener Spannungszustand}) . \quad (8.4)$$

Die Größe von  $G$ , als verschmierte Betrachtung des Spannungszustandes an der RiBspitze, kann experimentell z.B. mit Hilfe der Compliance-Methode bestimmt werden.

Betrachtet wird die Flachprobe mit einseitigem Anriß, s. Bild 8.4 nach /62/, unter einer statischen Belastung  $F$ . Entsprechend ihrer Steifigkeit verlängert sich die Probe um das Maß  $\Delta l$ . Die gespeicherte elastische Energie  $U_e$  beträgt

$$U_e = \frac{1}{2} F \cdot \Delta l \quad (8.5)$$

Durch eine RiBverlängerung  $da$  wird die Probe unter Last nochmals um den Wert  $d(\Delta l)$  verlängert. Die Energiebilanz führt zu

$$F \cdot d(\Delta l) = dU_e + G \cdot da . \quad (8.6)$$

Der Arbeit der äußeren Kraft  $F \cdot d(\Delta l)$  steht die Änderung der elastischen

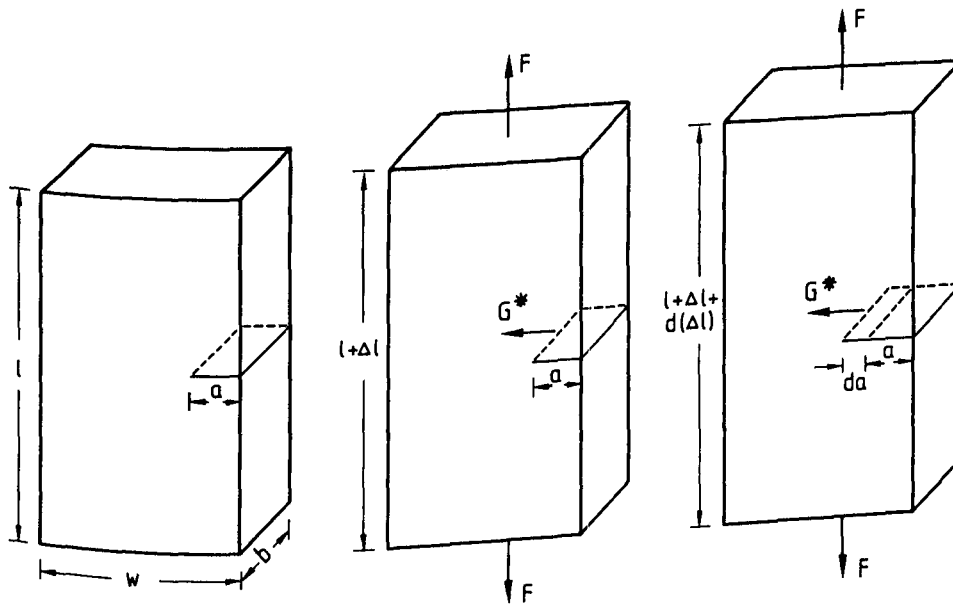


Bild 8.4: Flachprobe mit einseitigem Anriß, nach /62/

Energie  $dU_e$  und die Arbeit der Rißerweiterungskraft  $G \cdot da$  gegenüber. Die Berücksichtigung der Nachgiebigkeit  $C=1/c$  (compliance) der Probe, mit  $c$  als Federsteifigkeit, führt zu

$$G = \frac{F^2}{2B} \cdot \frac{dN}{da} = \frac{F^2}{2wB} \cdot \frac{dC}{d\left(\frac{a}{w}\right)} \quad (8.7)$$

Mit Gl.(8.3) folgt aus Gl.(8.7)

$$k = \sigma \cdot \sqrt{a \cdot \pi} \cdot f\left(\frac{a}{w}\right) \quad (8.8)$$

mit

$$f\left(\frac{a}{w}\right) = \sqrt{\frac{E}{1-\nu^2} \cdot \frac{w \cdot b}{2 a \pi} \cdot \frac{dC}{d\left(\frac{a}{w}\right)}} \quad (8.9)$$



Mit Hilfe der Korrekturfunktion  $f(a/w)$  kann der Geometrie- und Versuchskörpereinfluß bei der experimentellen Bestimmung des Spannungsintensitätsfaktors  $k$  berücksichtigt werden. Für eine Vielzahl von Versuchskörpern liegen Korrekturfunktionen vor. Beim Experiment ist die genaue Einhaltung der Bedingungen, die die Versuchskörpergeometrie, Belastung etc. betreffen erforderlich. Für nicht bekannte Versuchskörperformen und -abmessungen muß die Korrekturfunktion experimentell bestimmt werden. Die Bestimmung der Bruchzähigkeit mit Hilfe der compliance-Methode setzt voraus, daß der Schädigungsprozeß nur im Riß stattfindet.

### 8.2.2 Rißöffnungsmoden

Die zuvor hergeleiteten Beziehungen gehen von der Orientierung des Risses normal zur Kraftrichtung (mode I) aus. Daneben werden die Rißöffnungsarten mode II (reine Schubbeanspruchung) und mode III (reine Verscherung der Rißufer) nach Bild 8.5 unterschieden. Die Kombination unterschiedlicher Moden ist möglich. So liegt bei geklebten Verbindungen in der Regel eine

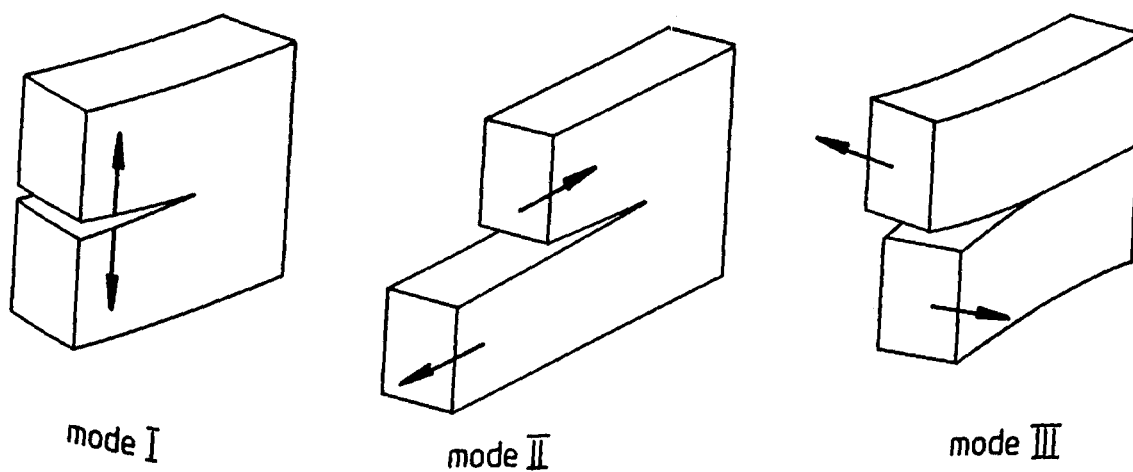


Bild 8.5: Rißöffnungsmodus I bis II

Beanspruchung als Kombination aus mode I und II vor, wenn der äußere Spannungszustand in Bezug zur Orientierung der Klebfläche betrachtet wird. Maßgebend ist jedoch der Spannungszustand an der Rißspitze und damit die Orientierung des Risses im Spannungsfeld. Irwin /63/, oder nach Trantina /64/, gibt ein Kriterium für die Vorhersage der Richtung eines Risses an. Demnach verläuft ein Riß entlang des Pfades normal zur größten Zugspannungsrichtung, so daß die Schubspannungen entlang der Rißufer verschwinden und an der Rißspitze immer eine mode I Beanspruchung vorherrscht. Erdogan und Sih /65/ unterstützen diese Hypothese durch eine Vielzahl von Versuchen. Das Bruchverhalten war immer auf eine reine Rißöffnung nach mode I zurückzuführen, Rißöffnungen nach mode II oder III traten nicht auf.

Die Kurzzeitzugversuche an verklebten Stahlprismen nach Kapt.5 und das hierauf basierende Bruchkriterium haben gezeigt, daß sich in der relativ dicken Klebschicht ein Spannungszustand einstellt, bei dem das Überschreiten der maximalen Hauptzugspannung zum Bruch führt. Für eine bruchmechanische Rißfortschrittsbetrachtung ist somit der mode I Zustand maßgebend, da die Rißbildung in der Klebschicht normal zur Hauptzugspannungsrichtung verläuft. Bei dünnen Klebschichten mit Einfluß von Querdehnungsbehinderung an den relativ starren Fügeteiloberflächen kann dagegen eine Kombination aus mode I und II vorliegen. Aufgrund der bei der Methode der geklebten Bewehrung vorkommenden dicken Klebschichten wird dieser Fall hier nicht weiter verfolgt.

### 8.2.3 Experimentelle Bestimmung der Bruchzähigkeit unter statischer Beanspruchung

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte untersucht werden, ob und wie bruchmechanische Konzepte auf geklebten Stahl-Stahl-Verbindungen anzuwenden sind. Hierzu wurde exemplarisch der 60°-Versuchskörper nach Kap. 5 verwendet. Die folgenden Betrachtungen basieren auf dem Konzept der linear-elastischen Bruchmechanik.

Zur experimentellen Bestimmung der Bruchzähigkeit (fracture toughness) ist es erforderlich, die Nachgiebigkeit des Versuchskörpers bei definierter Rißlänge zu bestimmen, um so die Korrekturfunktion  $f(a/w)$  angeben zu können. Bei zwei unter einem Fugenneigungswinkel von 60° miteinander verklebten Stahlhälften wurde mit einem Sägeschnitt in Klebschichtmitte ein

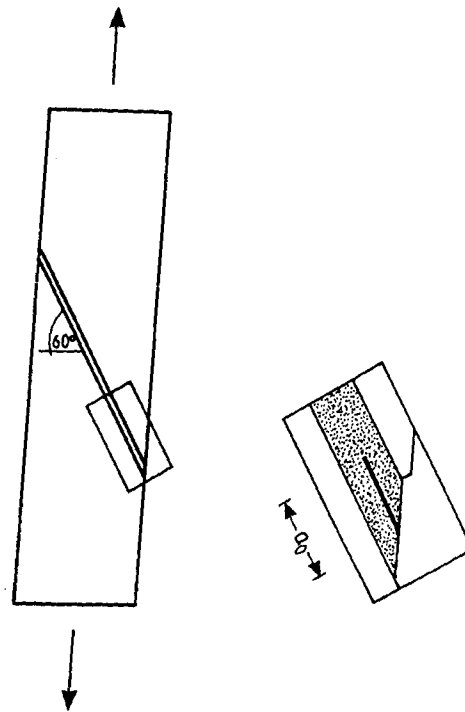


Bild 8.6: Initialriß in der Klebschicht

definierter Initialriß  $a_0$  vorgegeben, s. Bild 8.6. Zur Ausbildung des charakteristischen Spannungszustandes an der Rißspitze erfolgte eine dynamische Belastungsphase mit einigen Lastwechseln. Anschließend wurde die Kraft-Verformungscharakteristik des geschädigten Versuchskörpers bestimmt, wobei die Belastung nur im linear-elastischen Bereich der Kraft-Verformungsbeziehung erfolgte. Nach Entlastung wurde der Riß um  $\Delta a$  erweitert und der o.a. Vorgang wiederholt. Die so ermittelte Kraft-Verformungs-Charakteristik für verschiedene Rißlängen zeigt Bild 8.7.

Für jede betrachtete Rißlänge  $a$  kann die Nachgiebigkeit des Versuchskörpers  $C$  ermittelt werden. Es ist üblich, den Zusammenhang von  $C = f(a/w)$  durch eine analytische Funktion zu approximieren. Eine nichtlineare Regressionsanalyse führt zur funktionalen Beschreibung der Abhängigkeit von  $C = f(a/w)$ , s. Bild 8.8, nach Gl.(8.10).

$$C = 264,3 \cdot 10^{-7} \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 15,2 \cdot 10^{-7} \left( \frac{a}{w} \right)^2 + 3,9 \cdot 10^{-7} \left( \frac{a}{w} \right) + 6,6 \cdot 10^{-7} \quad (8.10)$$

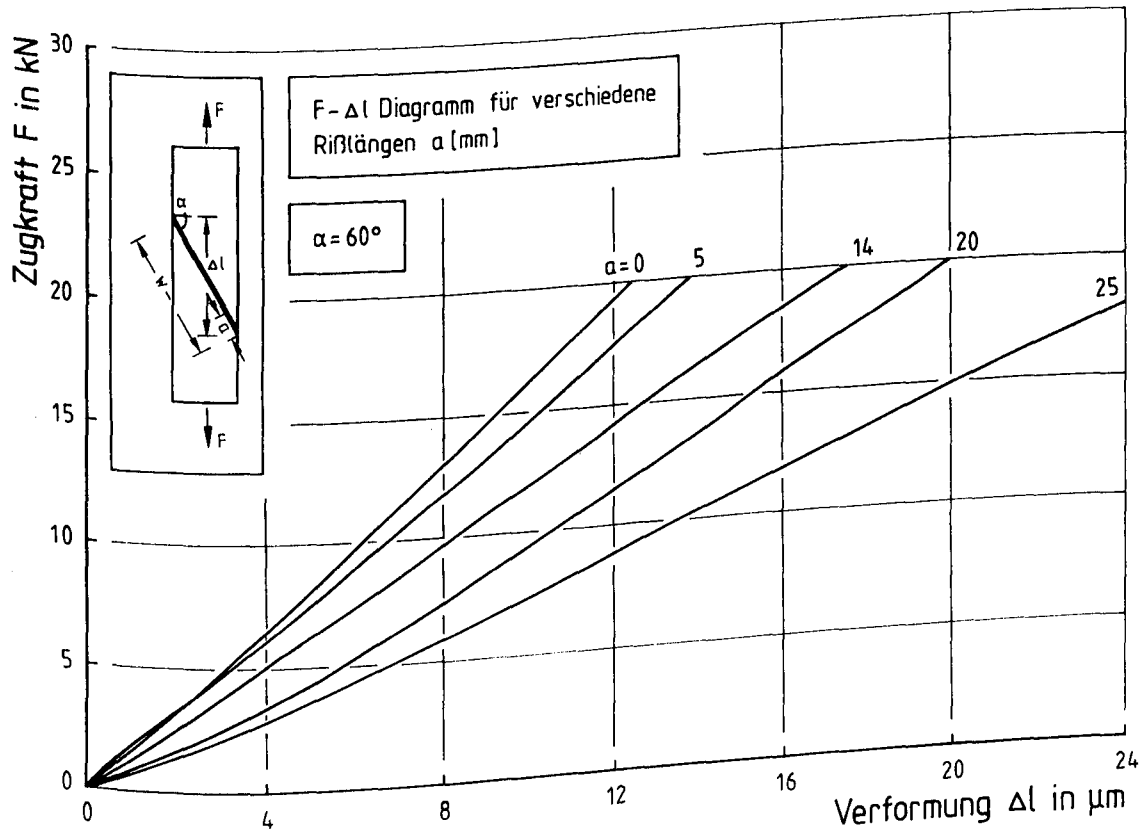


Bild 8.7: Kraft-Verformungsbeziehung für verschiedene Rißlängen

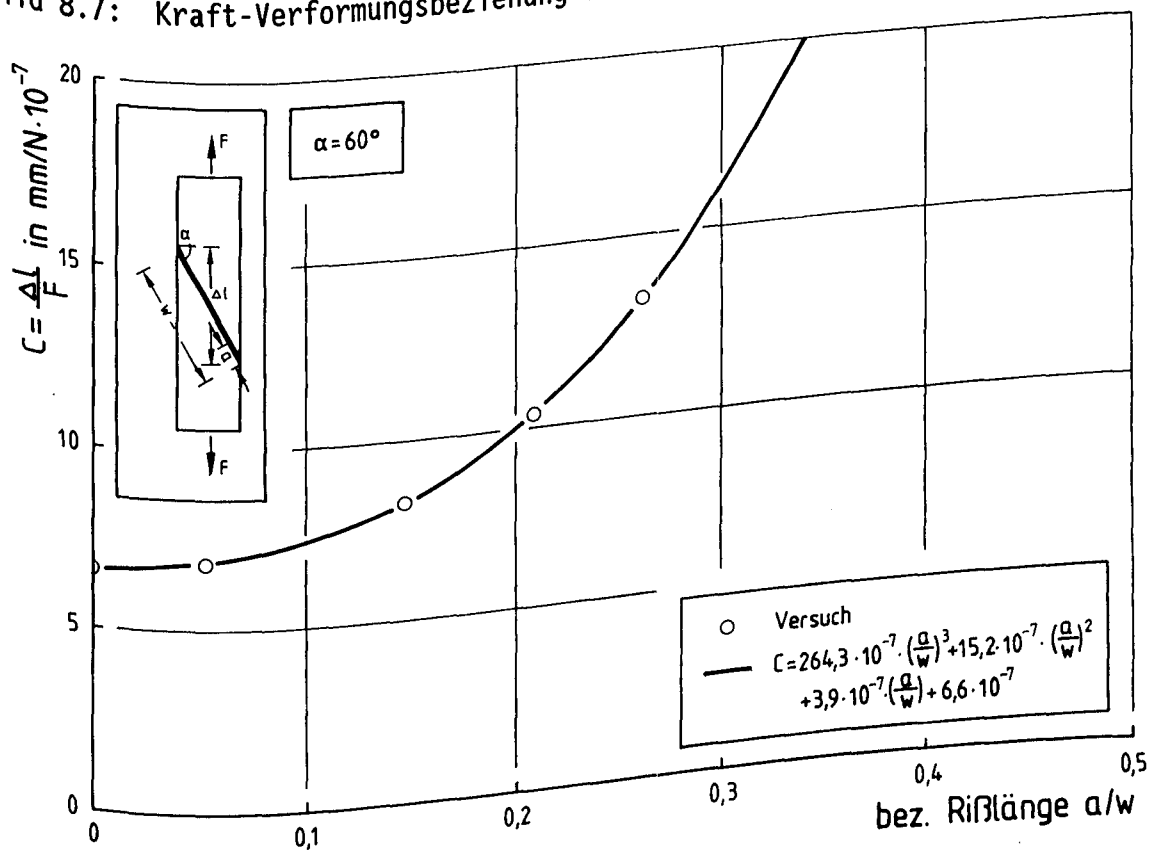


Bild 8.8: Abhängigkeit der Nachgiebigkeit  $C$  von der Rißlänge

Die Bildung von  $dC/d(a/w)$  führt zu Gl.(8.11) und Bild 8.9:

$$\frac{dC}{d\left(\frac{a}{w}\right)} = 7,92 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{a}{w}\right)^2 + 3,04 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{a}{w}\right) + 3,87 \cdot 10^{-7} \quad (8.11)$$

Damit kann mit Hilfe von Gl.(8.11) und (8.9) die RiBerweiterungskraft  $G$  angegeben werden.

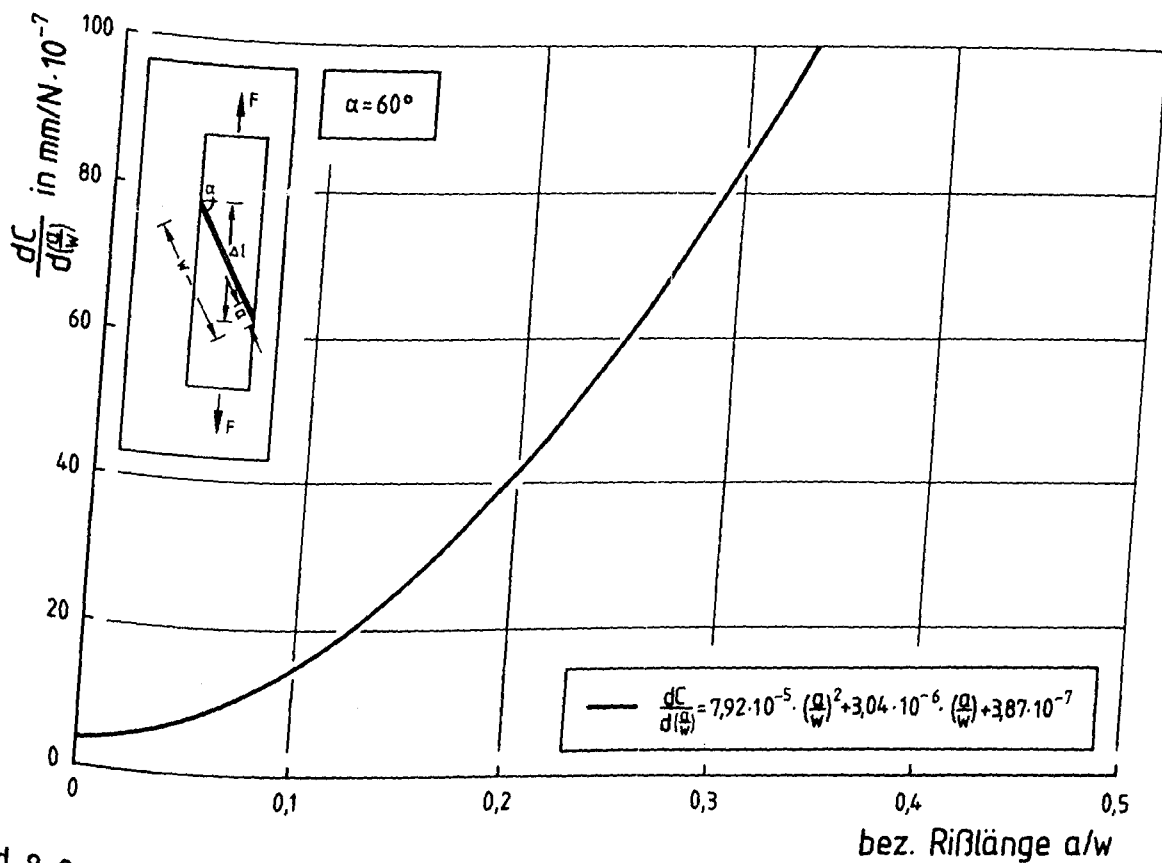


Bild 8.9: Abhängigkeit von  $dC/d(a/w)$  von der Rißlänge

Nach der letzten Laststufe wurde die Resttragfähigkeit des Versuchskörpers im statischen Kurzzeitzugversuch ermittelt. Das Versagen trat bei einer Zugkraft von  $F_u = 27,5 \text{ kN}$  ein. Die Verlängerung  $\Delta l$  bei Erreichen der Höchstlast wurde zu  $\Delta l = 29,5 \mu\text{m}$  bestimmt.

Zur Berechnung einer kritischen RiBerweiterungskraft  $G_c$  ist es erforderlich, die Länge des Risses bei Beginn der instabilen RiBausbreitung zu kennen. Bei der bruchmechanischen Untersuchung von Metallen ist es üblich, die Rißlänge aus der Fraktografie der Bruchfläche zu ermitteln, auf

der Anriß und Rißfortschritt unterscheidbar sind. Dieses gelang bei dem o.g. Versuch 60/10 nicht. Mit dem Versuch 60/18 steht jedoch ein weiterer statischer Zugversuch mit gleicher Geometrie zur Verfügung, bei dem die Kraft-Verformungscharakteristik über das Kraftmaximum hinaus bestimmt werden konnte, s. Bild 8.10. Das endgültige Versagen trat bei einer

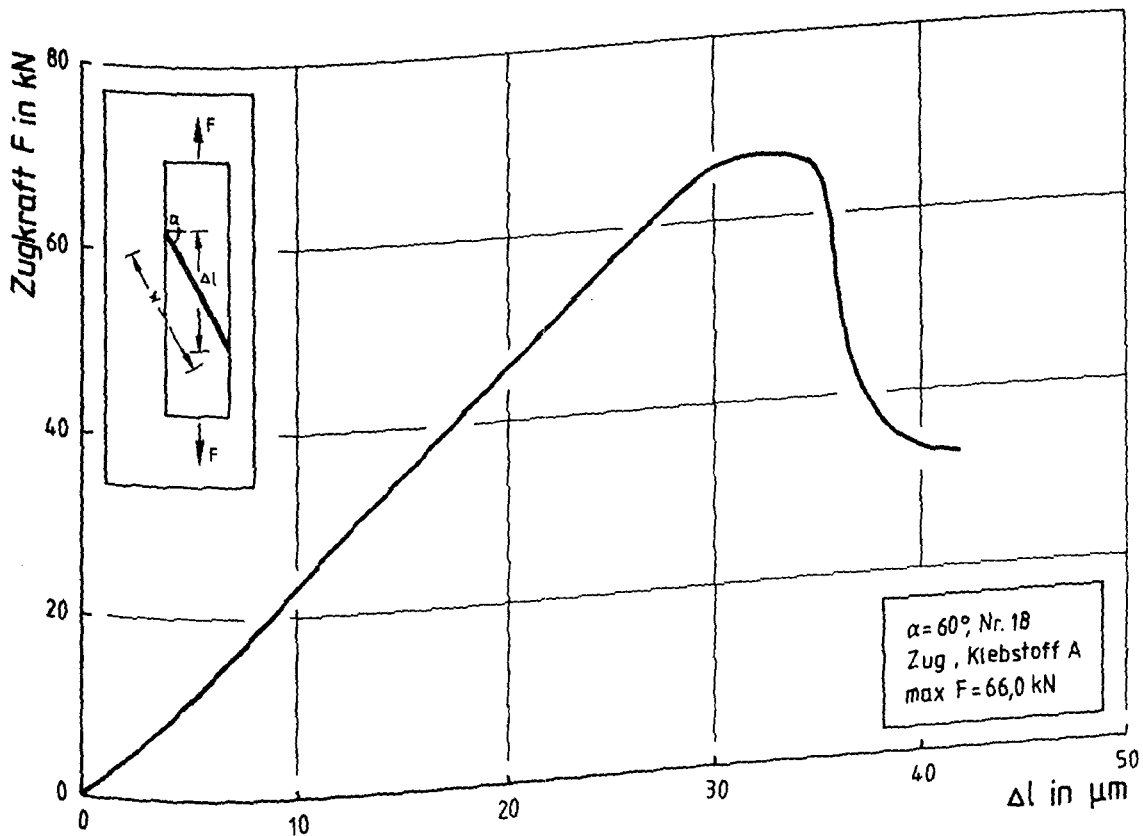


Bild 8.10: Kraft-Verformungsbeziehung für Versuch 60/18

Belastung von  $F_u = 32,7$  kN auf. Aus dem Bruchbild, s. Bild 8.11, kann eine kritische Rißlänge von  $a_c = 0,5 \cdot w$  gemessen werden. Damit ergibt sich die Rißerweiterungskraft  $G_c$  bei instabiler Rißausbreitung unter Berücksichtigung von Gl. (8.11) zu

(8.12)

$$G_c = 3,02 \text{ N/mm}$$

bzw. in Form des Spannungsintensitätsfaktors  $k_c$  mit Gl. (8.8)

(8.13)

$$k_c = \sigma_n \cdot \sqrt{a_c \pi} \cdot f\left(\frac{a_c}{w}\right) = 72,4 \text{ N/mm}^{3/2}$$

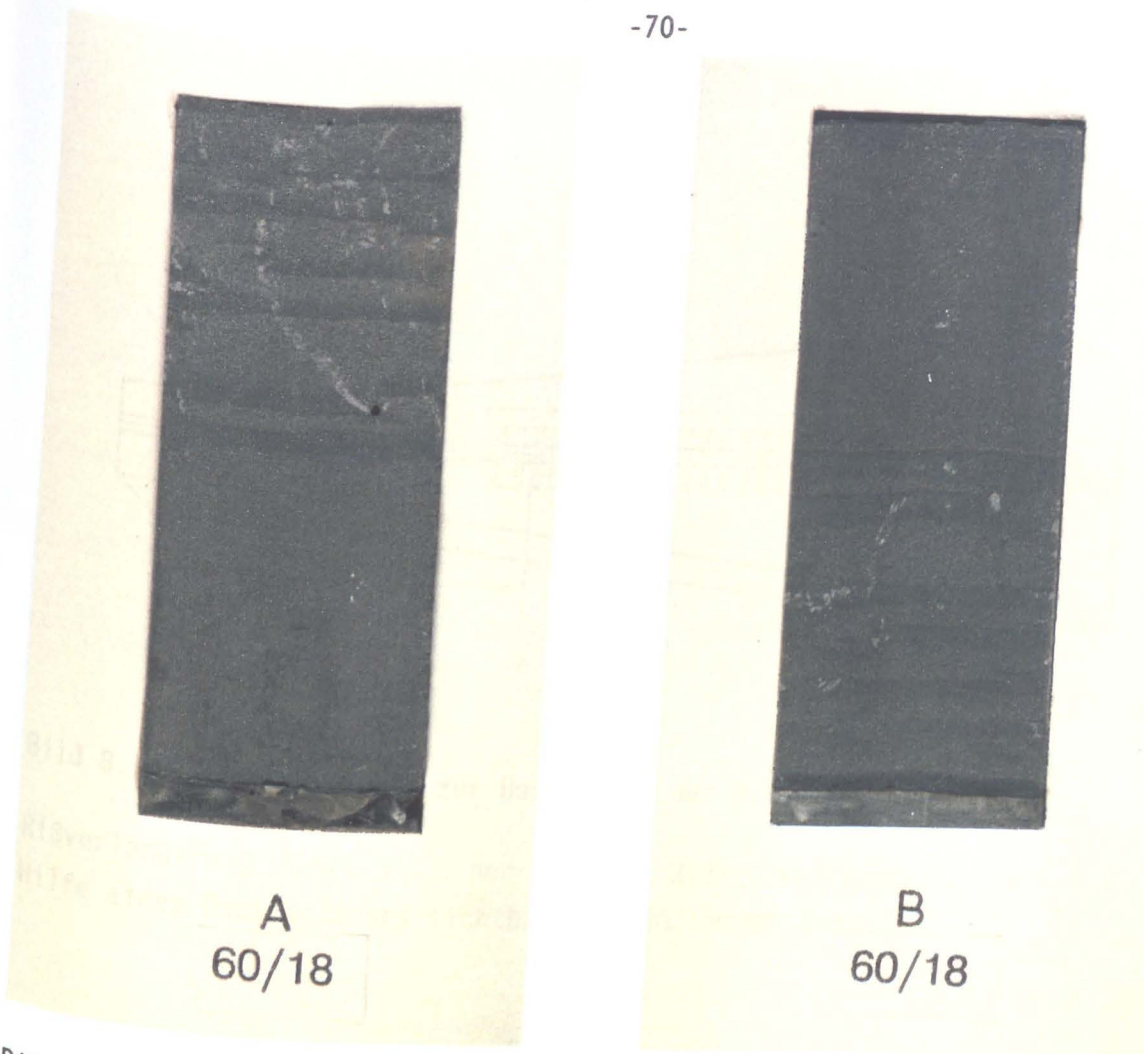


Bild 8.11: Bruchfläche des Versuches 60/18, Zug, Klebstoff A

Ein Wert von  $G_C = 3,02 \text{ N/mm}$ , resp.  $3020 \text{ N/m}$  liegt in der Größenordnung der in der Literatur zu findenden  $G_C$ -Werte. So wird in /67/ eine Schwankungsbreite für  $G_C$  von  $1400$  bis  $4000 \text{ N/m}$  für gefüllte Epoxidharze angegeben. Im folgenden wird die Rißausbreitung unter dynamischer Belastung betrachtet.

#### 8.2.4 Bestimmung des Rißfortschrittes unter dynamischer Beanspruchung

Der in Kap. 8.1 erläuterte Schädigungsprozeß unter dynamischer Belastung ist das Resultat einer Vergrößerung von Fehlstellen und Einzelrissen. Bei den folgenden Betrachtungen werden diese Fehlstellen als Einzelriß betrachtet, der in Abhängigkeit von der Lastspielzahl an Länge zunimmt.

Zur Bestimmung der Rißlänge während des dynamischen Versuches stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Neben den optischen Meßverfahren mit Hilfe von Lichtmikroskopie können Rißlängen auch indirekt bestimmt werden. Ein Beispiel hierfür zeigt Bild 8.12 nach /66/, wo ein elektrisch leitendes Gitter über die Klebfläche hinweg auf den Versuchskörper geklebt wird. Eine

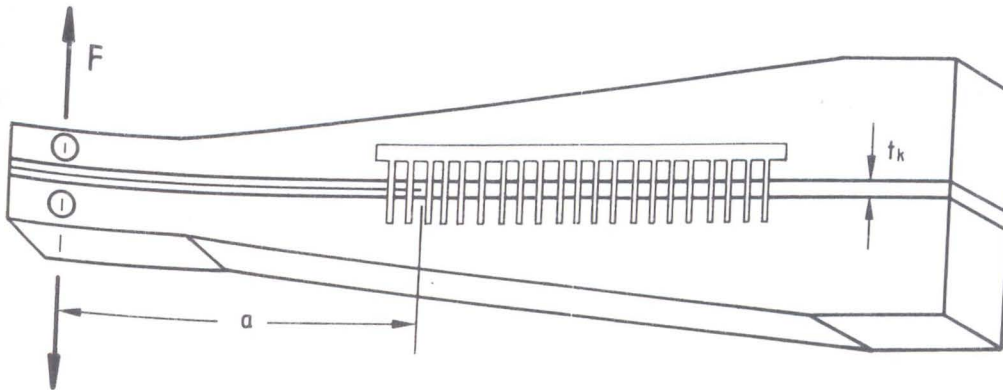


Bild 8.12: Versuchskörper zur Bestimmung der Rißlänge, nach /66/

Rißverlängerung führt zu einer lokalen Widerstandsänderung, die z.B. mit Hilfe eines Oszilloskopes sichtbar gemacht werden kann.

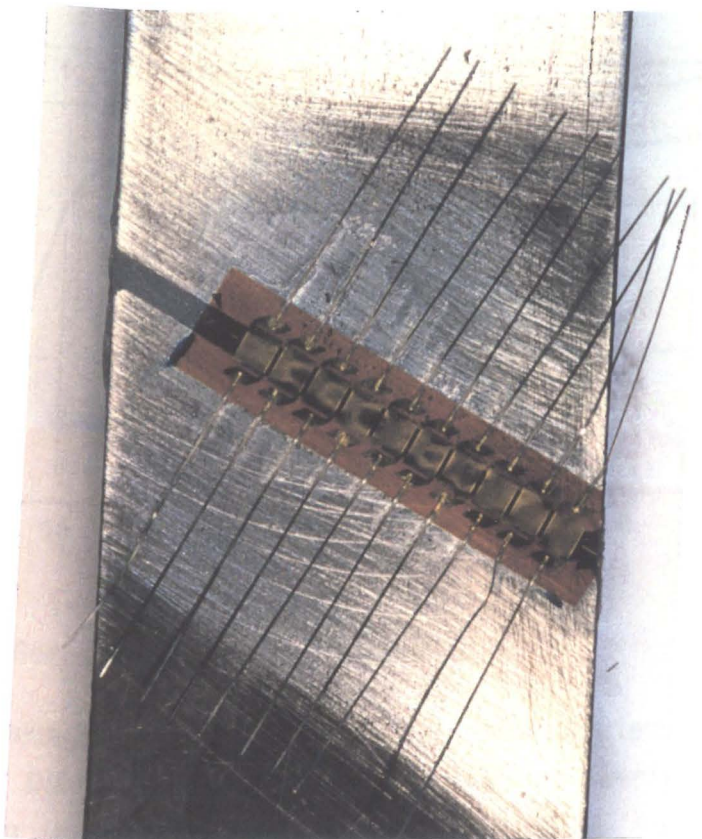


Bild 8.13: Versuchskörper mit appliziertem Ketten-DMS



Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde versucht, den Ribfortschritt indirekt durch normal zur Klebefuge orientierten Kettendehnmeßstreifen zu bestimmen. Bild 8.13 zeigt exemplarisch die Lage eines Ketten-DMS mit 4mm Meßlänge in Bezug zur Klebefuge. Es wurde erwartet, daß es im Laufe des dynamischen Versuches zu deutlichen Unterschieden in den lokalen Dehnungen entlang der Klebschichtlänge kommen würde. In Bild 8.14 sind die gemessenen Dehnungen für einen Versuchskörper mit 30° Klebefugenneigung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl dargestellt. Nach dem Anfahren der Oberlast von  $F^0=30$  kN sind die Werte der DMS-Messungen nahezu identisch. Erst mit Beginn der dynamischen Belastungsphase stellt sich eine ungleichförmige Dehnungsverteilung über die Klebelänge ein. Kurz vor dem Bruch steigen die Dehnungen überproportional an.

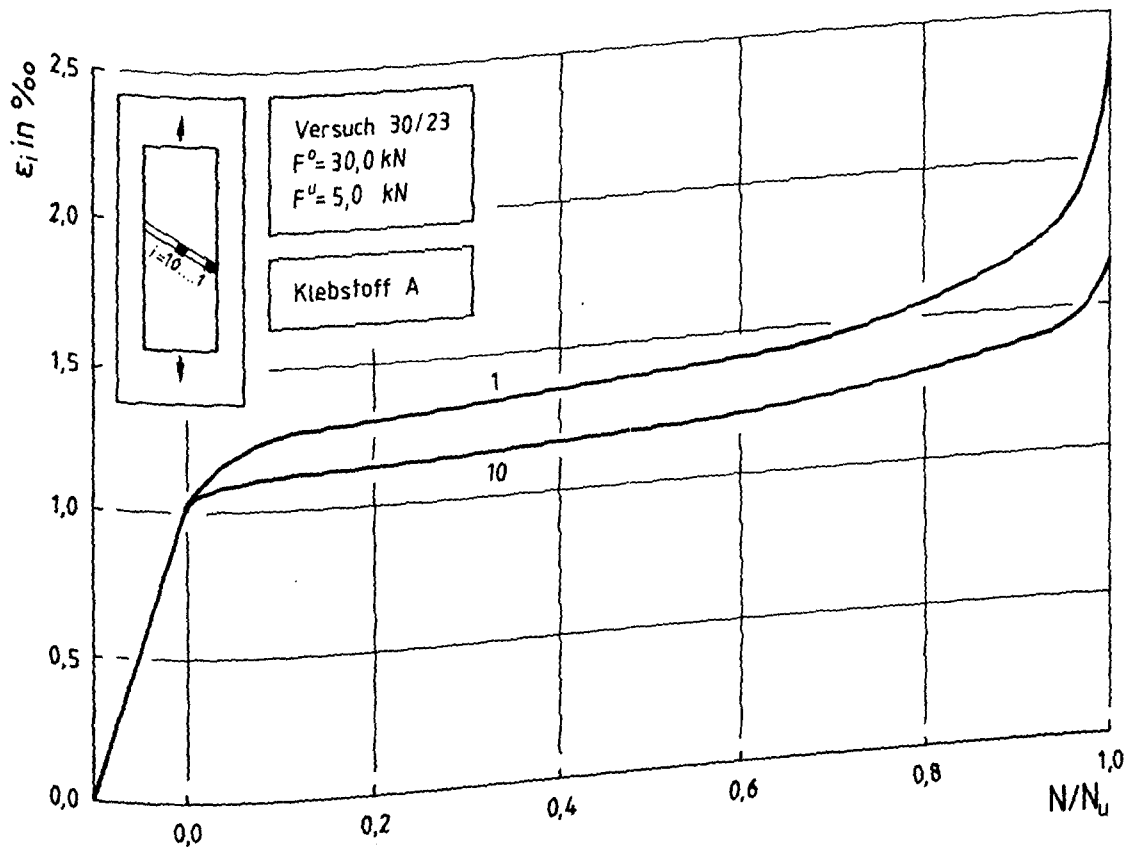


Bild 8.14: Gemessene Klebschichtdehnungen

Da der Dehnungsverlauf den Schädigungsprozeß widerspiegelt, werden die gemessenen Dehnungen zur Bestimmung eines Wertes für die Riblänge herangezogen werden. Betrachtet wird Bild 8.15, in dem für verschiedene Lastspielzahlen die gemessene Dehnungsverteilung über die Klebschichtlänge dargestellt ist. Zu erkennen ist, daß die gemessenen Dehnungen nahezu

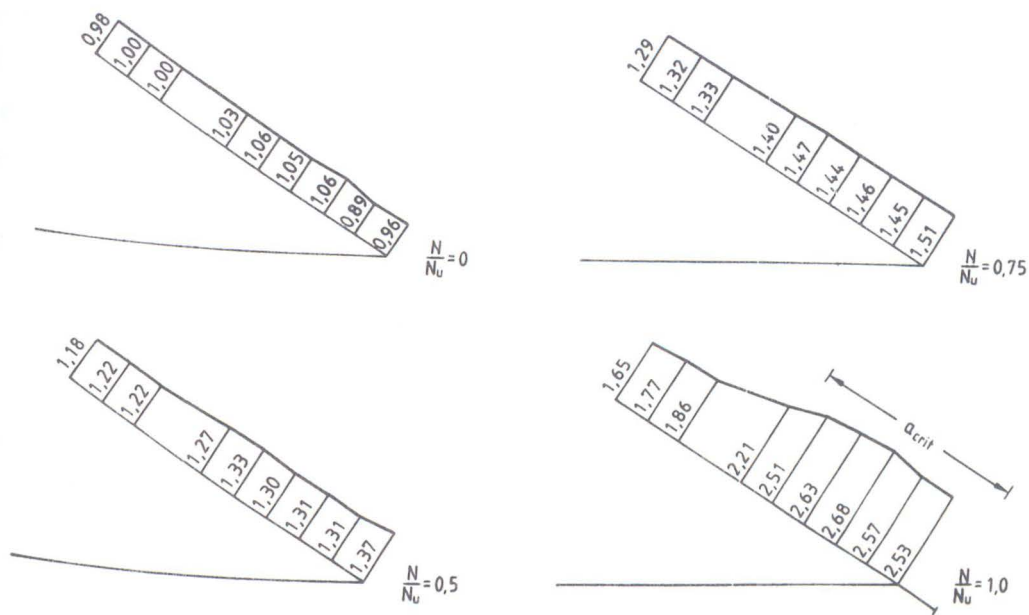


Bild 8.15: Gemessene Klebschichtdehnungen für ausgewählte Lastspielzahlen gleichmäßig verteilt sind. Erst kurz vor Erreichen der Bruchlastspielzahl ( $N/N_u = 1$ , s. Bild 8.15-d) ) ist eine deutliche Differenz zwischen den Randdehnungen und der Dehnung im mittleren Bereich der Klebelänge zu erkennen. Ein Blick auf die Bruchfläche, s. Bild 8.16, zeigt einen



Bild 8.16: Bruchfläche des Versuches 30/23

deutlichen Unterschied zwischen dem lokalen Klebschichtversagen unter dynamischer Beanspruchung und dem spöden Restbruch nach Erreichen der Bruchlastspielzahl. Die Rißlänge, bei der unter der angelegten Oberlast der Restbruch eintritt, wird als  $a_{crit}$  bezeichnet. Der Wert von  $a_{crit} \approx 0,34 \cdot w$  korrespondiert mit der Dehnungsverteilung für  $N/N_u = 1$ , s. Bild 8.15-d).

Zur Bestimmung der Rißlänge in Abhängigkeit von der Lastspielzahl werden die Dehnungsdifferenzen zwischen dem DMS 1 am Klebschichttrand und dem DMS 10 im Innern der Klebschicht betrachtet. Hierdurch wird die im bruchmechanischen Sinn nicht schädigungswirksame gleichförmige Kriechverformung der Klebschicht eliminiert. Bild 8.17 zeigt den Verlauf der aus der Differenz der Dehnungen berechneten bezogenen Rißlänge  $a/a_{crit}$  in Abhängigkeit von der Lastspielzahl. Der Verlauf ist gekennzeichnet durch eine progressive Vergrößerung von  $a/a_{crit}$  ab ca.  $0,6 \cdot N_u$ .

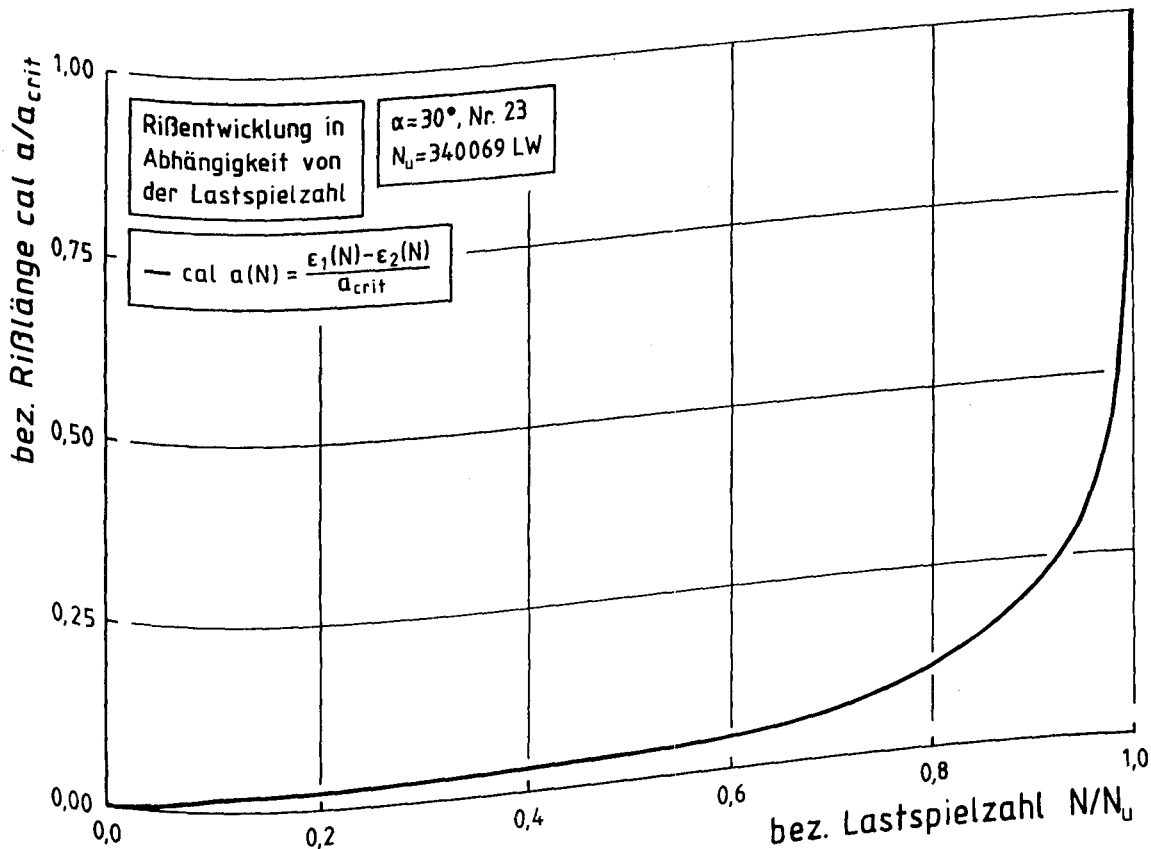


Bild 8.17: Rißentwicklung in Abhängigkeit von der Lastspielzahl

### 8.2.5 Auswertung

Erreicht die im vorangehenden Kapitel ermittelte Rißlänge eine Größe, die in Kombination mit der angelegten Spannung zum kritischen Spannungsintensitätsfaktor  $k_c$  führt, kommt es zum spröden Restbruch der Klebschicht. Da der Spannungszustand an der Rißspitze durch den Spannungsintensitätsfaktor  $k$  vollständig beschrieben ist, kann auch die Rißausbreitungsgeschwindigkeit von der Größe von  $k$  abhängig gemacht werden. Es wird eine Schwingbreite  $\Delta k$  eingeführt, die nach Gl.(8.14) bestimmt wird:

(8.14)

$$\Delta k = \Delta \sigma \cdot \sqrt{a \cdot \pi} \cdot f(a/w)$$

mit  $\Delta \sigma = \sigma^0 - \sigma^u$

Mit der Kenntnis der Zunahme der Rißlänge je Lastwechsel ( $da/dN$ ) können Wertepaare von  $da/dN$  und  $\Delta k$  im doppellogarithmischen Maßstab aufgetragen werden. Der sich i.a. ergebende s-förmige Kurvenverlauf, in Bild 8.18 schematisch dargestellt, nähert sich asymptotisch den beiden Grenzen  $k_0$  und  $k_c$  an. Der Wert  $k_c$  entspricht dem kritischen Spannungsintensitätsfaktor nach Gl.(8.13). Der Wert  $k_0$  ist ein unterer Grenzwert für die Ermüdungsrißausbreitung.

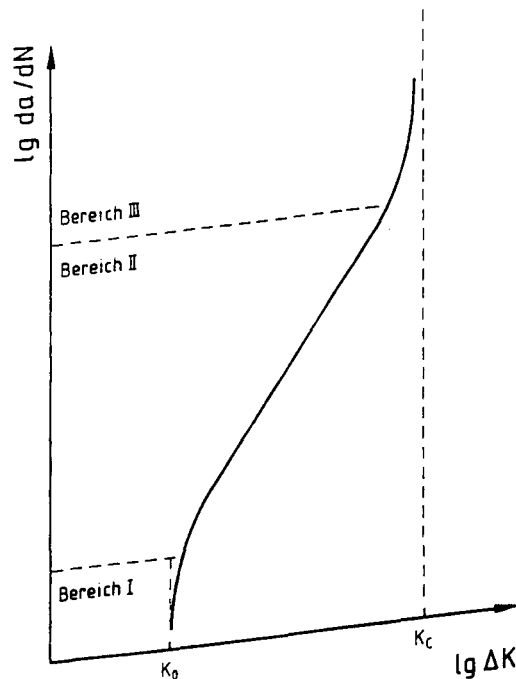


Bild 8.18: Schematische Darstellung der Abhängigkeit von  $da/dN$  von  $\Delta k$

Es ist üblich, den mittleren Bereich II durch eine in doppellogarithmischer Darstellung linear verlaufenden Beziehung, der s.g. Paris-Gleichung, darzustellen, s. Gl.(8.15):

(8.15)

$$da/dN = C \cdot \Delta k(N)^m,$$

mit einem stoffabhängigem Exponenten  $m$  und einem Faktor  $C$ , der von der Belastungsart abhängig ist.  $\Delta k$  kann bei konstanter Spannungsamplitude nur durch Rißlängenwachstum  $\Delta a$  während des dynamischen Versuches zunehmen.

Unter Berücksichtigung von Gl.(8.14) und des lastspielzahlabhängigen Verlaufs der Rißlänge nach Bild 8.17 wurden Wertepaare von  $da/dN$  und  $\Delta k$  ermittelt. Als Korrekturfunktion  $f(a/w)$  wurde Gl.(8.11) für den 60°-Versuchskörper verwendet. Eine Ermittlung der Korrekturfunktion für den 30°-Versuchskörper steht noch aus. Die Abhängigkeit von  $da/dN$  von  $\Delta k$  zeigt Bild 8.19. Für den Bereich II ergibt die Regressionsanalyse eine Beziehung in Form der Paris-Gleichung von

(8.16)

$$da/dN = 3,8 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta k^{5,03}.$$

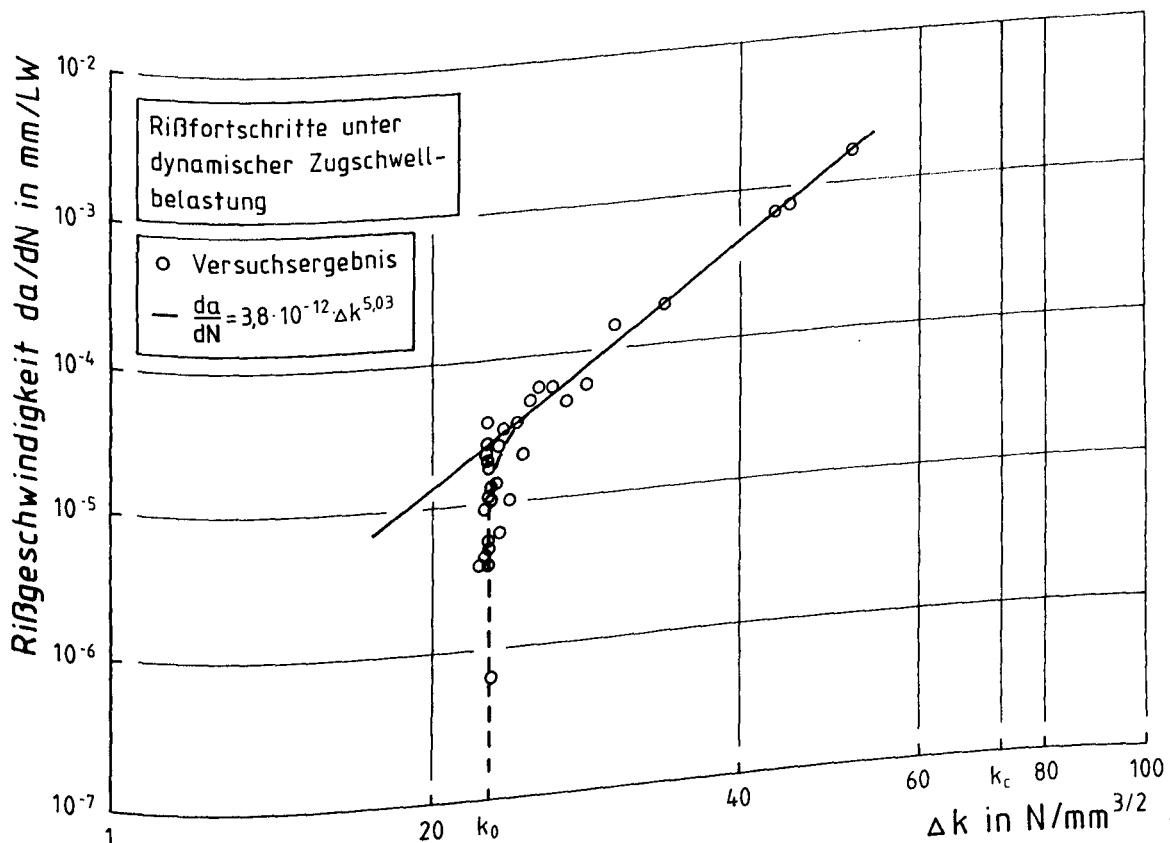


Bild 8.19: Rißfortschritt unter dynamischer Zugschwellbelastung

Als oberer Grenzwert für die Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors ist in Bild 8.19 der Wert  $k_c = 72,4 \text{ N/mm}^{3/2}$  nach Gl.(8.13) eingetragen, der definitionsgemäß den Beginn des instabilen Rißwachstums und damit den Bruchzustand beschreibt.

Die experimentelle Bestimmung des unteren Grenzwertes  $k_0$  ist nur mit großem Versuchsaufwand möglich, da sichergestellt werden muß, daß es zu keinem weiteren Rißfortschritt kommt. Große Lastspielzahlen in der Größenordnung bis zu  $10^8$  Lastwechseln sind dabei erforderlich. Aus Bild 8.19 kann der Wert von  $k_0$  vorsichtig zu  $k_0 \approx 22 \text{ N/mm}^{3/2}$  geschätzt werden.

Bild 8.19 impliziert, daß zu einer Schwingbreite des Spannungsintensitätsfaktors  $\Delta k$  nur eine einzige Rißausbreitungsgeschwindigkeit  $da/dN$  gehört. Ein kleiner Riß mit großem  $\Delta \sigma$  belastet führt zur gleichen Schädigung wie eine Probe mit großem Riß, die mit kleinem  $\Delta \sigma$  belastet wird.

Mit der Beziehung nach Bild 8.19 und speziell für den Bereich II mit Gl.(8.16), steht ein Verfahren zur Verfügung, mit dem ein Rißfortschritt unter dynamischer Beanspruchung angegeben werden kann. Belastungsgrenzen und Restlebensdauer bei vorhandener Anrißlänge können definiert, und eine untere Schädigungsgrenze kann angegeben werden. Anwendung wird dieses Kriterium bei der Erstellung eines Bemessungsmodells für die Methode der geklebten Bewehrung finden.

#### 8.2.6 Offene Probleme

Für eine verallgemeinerbare Anwendung der o.g. Methode zur Bestimmung der Rißausbreitung in einer epoxidharzverklebten Fuge konnten folgende Punkte im Rahmen dieses Vorhabens nicht geklärt werden:

- Einfluß der Fugenneigung und damit der Belastung der Klebschicht auf die Rißbildung

- Bestimmung der Korrekturfunktionen für Fugenneigungswinkel  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$

- Einfluß der Klebstoffart auf den Rißfortschritt

- Überprüfung der Anwendbarkeit von Schadensakkumulationshypothesen

## 9. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Verstärkung von Stahl- oder Spannbetonbauteilen mit der Methode der geklebten Bewehrung setzt intakten Verbund zwischen den Fügepartnern Stahl-Epoxidharzklebstoff-Beton voraus. Ein in Versuchen mit laschenverstärkten Biegebauteilen vereinzelt beobachtetes Versagen ist der Bruch innerhalb der Klebschicht. Dieses Versagen trat als progressiver Klebverbundbruch vor allem unter dynamischer Belastung auf.

Nach einer Literaturstudie über das Tragverhalten geklebter Verbindungen wird an Probekörpern mit definierten Beanspruchungszuständen der Bruchmechanismus erforscht. Es werden Bruchkriterien des Klebschichtversagens sowohl für statische als auch für dynamische Belastung angegeben. Die Versuchsergebnisse zeigen, daß ein Bruchkriterium in Form einer parabolischen Einhüllenden der einachsigen Zug- und Druckfestigkeit der Klebstoffe verwendet werden kann.

Zur Bestimmung des Schädigungsfortschrittes werden bruchmechanische Untersuchungen durchgeführt. Nach der Bestimmung der Bruchzähigkeit in Form des  $k_C$ -Wertes wird der Schädigungsprozeß unter dynamischer Belastung auf Basis der linear-elastischen Bruchmechanik modelliert. Mit den ermittelten Beziehungen steht ein Verfahren zur Verfügung, mit dem Belastungsgrenzen und Restlebensdauer in Abhängigkeit von einer Schädigung in Form einer Anrißlänge definiert werden können.

Die im Rahmen dieses Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse zur Tragfähigkeit einer epoxidharzverklebten Fuge sollen in ein noch zu entwickelndes Bemessungskonzept für laschenverstärkte Bauteile Eingang finden.

## 10. LITERATUR

- /1/ Dietmann, H.: Spannungszustand und Festigkeitsverhalten, Literaturauswertung, 1. Teil : Statische Beanspruchung, Technisch-wissenschaftliche Berichte der Staatlichen Materialprüfungsanstalt an der Universität Stuttgart, Heft 68-04
- /2/ Rös, M.; Eichinger, A.: Die Bruchgefahr fester Körper bei ruhender Beanspruchung. Diskussionsbericht Nr. 172, EMPA Zürich, Zürich, 1949
- /3/ Eibl, J.; Ivány, G.: Studie zum Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbeton, Deutscher Ausschluß für Stahlbeton, Heft 260, Berlin, 1976
- /4/ Habenicht, G.: Kleben- Grundlagen, Technologie, Anwendungen, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 1986
- /5/ Franke, L.; Deckelmann, G.: Das Tragverhalten der Grenzflächen von Fugen, Bautechnik 66(1989), Heft 1
- /6/ Basler, E.; Witta, E.: Grundlagen für kraftschlüssige Verbindungen in der Vorfabrikation, Technische Forschungs- und Zementberatungsstelle der Schweizerischen Zementindustrie, Wildeg, 1966
- /7/ Schneider, W.; Bardenheier, R.: Versagenskriterien für Kunststoffe, Zeitschrift für Werkstofftechnik, 6(1975)
- /8/ Engasser, I.; Puck, A.: Festigkeit von Metallklebverbindungen bei Normal- und Schubspannungen, 1979
- /9/ Engasser, I.; Puck, A.: Untersuchungen zum Tragverhalten von Klebverbindungen, Kunststoffe, 70(1980)
- /10/ Engasser, I.; Puck, A.: Zur Bestimmung der Grundfestigkeiten von Klebverbindungen bei einfacher und zusammengesetzter Beanspruchung, Kunststoffe, 70(1980)
- /11/ Weigler, H.; Becker, G.: Zur Frage der Schubdruckfestigkeit von Beton, Beton- und Stahlbetonbau, 5/1964, S. 101 ff.
- /12/ Bay, H.: Zum Schubproblem des schlanken Stahlbetonträgers, Beton- und Stahlbetonbau, 6/1976, S. 138 ff.
- /13/ Volkersen, O.: Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten, Luftfahrtforschung 15, 1938, S. 41-47
- /14/ Goland, M.; Reissner, E.: The stresses in cemented joints, Journal of applied Mechanics, Vol. 66, 1944, pp. A-17-27
- /15/ Hart-Smith, L.J.: Adhesive bonded single-lap joints, NASA, Tech. Report CR 112236, 1973
- /16/ Hahn, O.: Festigkeitsverhalten und ingenieurmäßige Berechnung von einschnittig-überlappten Metallklebverbindungen, Habilitationsschrift, RWTH Aachen, 1975



- /17/ Althoff, W.: Neue Möglichkeiten zur Berechnung der Belastbarkeit von Klebverbindungen, Technische Akademie Esslingen, 1978
- /18/ Müller, G.: Der Verformungs- und Bruchvorgang an Metallverbindungen verschiedener Werkstoffe bei ein- und mehrachsiger statischer Belastung, Dissertation, TU Berlin, 1959
- /19/ Cornelius, E.A.; Stier, G.: Die Spannungsverteilung in Klebverbindungen, Aluminium 39, (1963), H. 5, S. 305-313
- /20/ Tschogl, N.W.: Journ. Polym. Sci., Part C, Polym. Sci., Symp. No. 32(1971), pp 239-267
- /21/ Schlimmer, M.: Anstrengungshypothese für Metallverbindungen, Zeitschrift für Werkstofftechnik, 13/1982, S.215 ff.
- /22/ Mostovoy, S.; Rippling, E.J.: Fracture Toughness of an Epoxy System, Journal of applied Polymer Science, Vol. 10 (1966), pp. 1351-1371
- /23/ Yi, Xiao-Su: Beitrag zum strukturabhängigen mechanischen Verhalten von Klebschichten, Dissertation Gesamthochschule Paderborn, 1991
- /24/ Rehm, G.; Franke, L.: Kleben im konstruktiven Betonbau, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 291, Berlin, 1982
- /25/ Kordina, K.; Teutsch, M.; Weber, W.: Spannbetonbauteile in Segmentbauart unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegung und Querkraft, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 350, Berlin, 1984
- /26/ Cirodde, R.: Techniques d'Assemblage par collage. In: Bull. RILEM Nr. 37, 1967, S. 253 - 261.
- /27/ L'Hermite, R.: L'application des colles et des Resines dans la Construction. In: Ann. ITBTP nr. 239, 1967, S. 1482 - 1497.
- /28/ Bresson, J.: Nouvelles recherches et application concernant l'utilisation des collage dans les structures. In: Ann. ITBTP, Nr. 278, 1971, S. 22 - 55.
- /29/ Bresson, J.: L'application du Beton plaque. In: Ann. ITBTP Nr. 297, 1972, S. 1 - 25.
- /30/ Betonbalken mit angeklebter Bewehrung unter Biege- und Schubbeanspruchung (japanisch). Herausgegeben vom Bauministerium in Tokyo, April 1971. Bericht Nr. 681.
- /31/ Sho-Bond Kagaku Co. Ltd.: Entwicklung von Verstärkungsmethoden für Betonplatten (japanisch). Sho-Bond Kagaku Co. Ltd., 4-25-21, AOKI Kawaguchi-City, Japan.
- /32/ Ladner, M.; Flueler, P.: Versuche an Stahlbetonbauteilen mit geklebter Armierung. In: Schweiz. Bauzeitung 92, 1974, S. 463 - 470.
- /33/ Hugenschmidt, F., Epoxy adhesives for concrete and steel. International Congress on Polymer concretes, London, Mai 1975.

- /34/ Ladner, M.; Weder, Ch.: Geklebte Bewehrung im Stahlbetonbau, Dübendorf: EMPA, 1981, Bericht Nr. 206.
- /35/ Irvin, C. A. K.: the strengthening of concrete beams by bonded steel plates. Transp. Road. Res. Lab. - Crowthorne/Berkshire: TRRL 1975, Sup. Rep. 160 UC.
- /36/ MacDonald, M. D.: The flexural behaviour of concrete beams with bonded external reinforcement. TRRL Crowthorne/Berkshire: TRRL 19/8, Sup. Rep. 415.
- /37/ Jones, R.; Swamy, R. N.; Ang, Th. H.: Unter and over reinforced concrete Beams with glued steel plates. In: Int. Journ. CEM. Comp. Light Concr. 4 (1982), S. 19 - 32.
- /38/ MacDonald, M. D.: The flexural performance of 3,5 m concrete beams with various bonded external reinforcements. TRRL Crowthorne/Berkshire: TRRL 1982, Sup. Rep. 728.
- /39/ Rostásy, F.S.; Ranisch, E.-H.; Alda, W.: Verstärkung von Spannbetonbrücken im Koppelfugenbereich durch angeklebte Stahllaschen. In Bauingenieur 56 (1981), S. 139 - 145.
- /40/ Rostásy, F.S.; Ranisch, E.-H.; Alda, W.: Nachträgliche Verstärkung von Spannbetonbrücken im Koppelfugenbereich durch angeklebte Stahllaschen. In: Forschung - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 326, Bonn: BMV 1982.
- /41/ Rostásy, F.S.; Ranisch, E.-H.: Strengthening of bridges with epoxy bonded steel plates. IABSE-Symposium, Washington 1982, Final Report, Vol. 39.
- /42/ Rostásy, F.S.; Ranisch, E.-H.: Einseitige Verstärkung gerissener Koppelfugenbereiche durch angeklebte Stahllaschen. In: Forschung - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 378, Bonn: BMV 1983.
- /43/ Ranisch, E.-H.: Zur Tragfähigkeit von Verklebungen zwischen Betonstahl und Beton - Geklebte Bewehrung -. Diss. TU Braunschweig 1982.
- /44/ Rostásy, F.S.; Ranisch E.-H.: Nachträgliche Verstärkung von Stahlbetonplatten durch Ankleben von Bewehrung. TU Braunschweig, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz/Land Niedersachsen - Braunschweig: Forschungsbericht 1983.
- /45/ Rostásy, F.S.; Ranisch E.-H.: Verstärkung von Stahlbetonplatten durch angeklebte Laschen aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Forschungsbericht, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Juli 1986.
- /46/ Rostásy, F.S.; Ranisch E.-H.: Bemessungshilfen für Stahlbetonplatten mit angeklebter Laschenverstärkung. Forschungsbericht, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig 1986.
- /47/ Laumer, R.: Schubfeste Klebeverbindung zwischen Stahlplatten und Stahlbetonbauteilen oder Spannbetonbauteilen. Zulassungsbescheid Z-36.1-4, Institut für Bautechnik, Berlin.

- /48/ Rostásy, F.S.; Holzenkämpfer, P.: Ingenieurmodell für das Verbundsystem Stahlbeton + Klebelasche, Teil 1, statische Grundversuche, IBMB, 3/1989.
- /49/ Holzenkämpfer, P.: Ingenieurmodelle des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile, Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1993
- /50/ Rostásy, F.S.; Hankers, Ch.: Tragverhalten des Verbundsystems Stahllasche-Beton unter dynamischer Beanspruchung, Abschlußbericht, Deutsche Forschungsgemeinschaft, Az.: Ro 288/31-1, in Vorbereitung
- /51/ Dietmann, H.; Baier, F.: Spannungszustand und Festigkeitsverhalten, 2. Teil: Schwingende Beanspruchung, Techn.-wiss.Ber. Staatliche Materialprüfungsanstalt Stuttgart, Heft 71-02, 1971
- /52/ Rostásy, F.S.; Hankers, Ch.: Ingenieurmodell für das Verbundsystem Stahlbeton + Klebelasche, Teil 2, Forschungsbericht, Inst. f. Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 1991
- /53/ Dengel, D.: Empfehlungen für die statistische Abschätzung des Zeit- und Dauerfestigkeitsverhaltens von Stahl, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Bd. 20 (1989)
- /54/ Richtlinie für die Durchführung des Dauerschwingversuches an Spannstählen, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 1977
- /55/ DIN 53285, Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 1984
- /56/ Matting, A.; Draugelates, U.: Journal of Adhesion, 11(1968)
- /57/ Marceau, J.A.; McMillan, J.C.; Scardino, W.M.: Cyclic stress testing of adhesive bonds, Adhesives Age, Vol 21(1978)
- /58/ Allen, K.W.; Smith, S.M.; Wake, W.C.; van Raalte, A.O.: The concept of an endurance limit for adhesive joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 5(1985)
- /59/ Mayss, G.: Fatigue Performance and Durability of Structural Adhesive Joints, Dissertation, University of Dundee, 1985
- /60/ Renton, W.J.; Vinson, J.R.: Fatigue behaviour of bonded joints in Composite Material Structures, Journal of Aircraft, Vol. 12 (1974)
- /61/ Draugelates, U.: Das Verhalten von Metallklebverbindungen unter schwingender Last, Kautschuk und Gummi - Kunststoffe, 11(1967)
- /62/ Heckel, K.: Einführung in die technische Anwendung der Bruchmechanik, Hanser Studien Bücher, 1983
- /63/ Irwin, G.R.: Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate, Journal of Applied Mechanics, 1957, p. 361 ff.
- /64/ Trantina, G.G.: Combined Mode Crack Extension in Adhesive Joints, Journal of Composite Materials, Vol. 6(1972)

- /65/ Erdogan, F.; Sih, G.C.: On the Crack Extension in Plates Under Plane Loading and Transverse Shear, Journal of Basic Engineering, 1963
- /66/ Mostovoy, S.; Rippling E.J.: Fracture Toughness of an Epoxy System, Journal of Applied Polymer Science, 10(1966)
- /67/ Johnson, W.S.: Adhesively Bonded Joints: Testing, Analysis and Design, ASTM, Ann Arbor (Michigan), 1988

# Anhang

Tab. A1: Ergebnisse der statischen Versuche (Klebstoff A)

| Fugen-<br>winkel $\alpha$ | Bez. | $F_u$<br>[kN] | $\sigma_0$<br>[MPa] | $\sigma_\alpha$<br>[MPa] | $\tau_\alpha$<br>[MPa] | $\sigma_{\alpha+90^\circ}$<br>[MPa] |
|---------------------------|------|---------------|---------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 0                         | 1    | 38,50         | 20,92               | 20,92                    | 0                      | 0                                   |
| 0                         | 2    | 36,50         | 19,84               | 19,84                    | 0                      | 0                                   |
| 0                         | 3    | 42,50         | 23,10               | 23,10                    | 0                      | 0                                   |
| 0                         | 4    | -175,00       | -95,11              | -95,11                   | 0                      | 0                                   |
| 0                         | 5    | 43,16         | 23,46               | 23,46                    | 0                      | 0                                   |
| 0                         | 9    | 42,60         | 23,15               | 23,15                    | 0                      | 0                                   |
| 15                        | 1    | 52,80         | 28,70               | 26,77                    | 7,17                   | 1,92                                |
| 15                        | 2    | 58,00         | 31,52               | 29,41                    | 7,88                   | 2,11                                |
| 15                        | 3    | 49,80         | 27,07               | 25,25                    | 6,77                   | 1,81                                |
| 15                        | 4    | 59,50         | 32,34               | 30,17                    | 8,08                   | 2,17                                |
| 30                        | 1    | 53,00         | 28,80               | 21,60                    | 12,47                  | 7,20                                |
| 30                        | 2    | 61,60         | 33,48               | 25,11                    | 14,50                  | 8,37                                |
| 30                        | 3    | 41,20         | 22,39               | 16,79                    | 9,70                   | 5,60                                |
| 30                        | 4    | -164,00       | -89,13              | -66,85                   | -38,59                 | -22,28                              |
| 30                        | 5    | -175,00       | -95,11              | -71,33                   | -41,18                 | -23,78                              |
| 30                        | 6    | -158,00       | -85,87              | -64,40                   | -37,18                 | -21,47                              |
| 30                        | 7    | -169,00       | -91,85              | -68,89                   | -39,77                 | -22,96                              |
| 30                        | 11   | 56,12         | 30,5                | 22,88                    | 13,21                  | 7,63                                |
| 30                        | 12   | -166,00       | -90,22              | -67,66                   | -39,07                 | -22,55                              |
| 30                        | 13   | -175,00       | -95,11              | -71,33                   | -41,18                 | -23,78                              |
| 30                        | 14   | 50,25         | 27,31               | 20,48                    | 11,83                  | 6,83                                |
| 30                        | 17   | 50,00         | 27,17               | 20,38                    | 11,77                  | 6,79                                |
| 60                        | 1    | 46,30         | 25,16               | 6,29                     | 10,90                  | 18,87                               |
| 60                        | 2    | 54,80         | 29,78               | 7,45                     | 12,90                  | 22,34                               |
| 60                        | 3    | 44,00         | 23,91               | 5,98                     | 10,35                  | 17,93                               |
| 60                        | 4    | -158,50       | -86,14              | -21,54                   | -37,30                 | -64,61                              |
| 60                        | 5    | -148,50       | -80,71              | -20,18                   | -34,95                 | -60,53                              |
| 60                        | 6    | -151,00       | -82,07              | -20,52                   | -35,54                 | -61,55                              |
| 60                        | 13   | -152,50       | -82,88              | -20,72                   | -35,89                 | -62,16                              |
| 60                        | 14   | -151,00       | -82,07              | -20,52                   | -35,54                 | -61,55                              |
| 60                        | 18   | 66,00         | 35,87               | 8,97                     | 15,53                  | 26,90                               |
| 60                        | 19   | 67,90         | 36,90               | 9,23                     | 15,98                  | 27,68                               |

Tab. A2: Ergebnisse der statischen Versuche (Klebstoff B)

| Fugen-<br>winkel $\alpha$ | Bez. | $F_u$<br>[kN] | $\sigma_0$<br>[MPa] | $\sigma_\alpha$<br>[MPa] | $\tau_\alpha$<br>[MPa] | $\sigma_{\alpha+90^\circ}$<br>[MPa] |
|---------------------------|------|---------------|---------------------|--------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| 0                         | 14   | 52,50         | 28,53               | 28,53                    | 0                      | 0                                   |
| 15                        | 9    | 57,80         | 31,41               | 29,31                    | 7,85                   | 2,10                                |
| 15                        | 10   | 52,30         | 28,42               | 26,52                    | 7,11                   | 1,90                                |
| 15                        | 11   | 58,80         | 31,96               | 29,82                    | 7,99                   | 2,14                                |
| 15                        | 12   | -192,00       | -104,35             | -97,36                   | 26,09                  | -6,99                               |
| 30                        | 26   | 64,00         | 34,78               | 26,09                    | 15,06                  | 8,70                                |
| 30                        | 27   | 58,50         | 31,79               | 23,85                    | 13,77                  | 7,95                                |
| 30                        | 31   | -190,00       | -103,26             | -77,45                   | 44,71                  | 25,82                               |
| 30                        | 32   | 46,80         | 25,43               | 19,08                    | 11,01                  | 6,36                                |
| 60                        | 23   | 74,25         | 40,35               | 10,09                    | 17,47                  | 30,26                               |
| 60                        | 24   | 76,19         | 41,41               | 10,35                    | 17,93                  | 31,06                               |
| 60                        | 25   | 84,50         | 45,92               | 11,49                    | 19,91                  | 34,44                               |
| 60                        | 26   | -199,00       | -108,15             | -27,04                   | 46,83                  | -81,11                              |
| 60                        | 27   | -191,00       | -103,80             | -25,95                   | 44,95                  | -77,85                              |
| 60                        | 28   | -189,00       | -102,72             | -25,68                   | 44,48                  | -77,04                              |

Tab. A3: Ergebnisse der dynamischen Versuche (Klebstoff A)

| Fugen-<br>winkel $\alpha$ | Bez. | $F^0$<br>[kN] | $F^u$<br>[kN] | Lastwechsel | $F_r$<br>[kN] |
|---------------------------|------|---------------|---------------|-------------|---------------|
| 0                         | 6    | 30,0          | 5,0           | 27359       | 49,3          |
| 0                         | 7    | 30,0          | 5,0           | 23530       |               |
| 0                         | 8    | 30,0          | 5,0           | 16104       |               |
| 0                         | 10   | 24,2          | 5,0           | 3888617     |               |
| 0                         | 11   | 30,0          | 5,0           | 672993      |               |
| 0                         | 12   | 27,4          | 5,0           | 3280000     | 53,3          |
| 0                         | 15   | 27,4          | 5,0           | 2516815     | 69,7          |
| 0                         | 16   | 38,0          | 5,0           | 241196      |               |
| 0                         | 17   | 38,0          | 5,0           | 460351      |               |
| 0                         | 18   | 38,0          | 5,0           | 416929      |               |
| 15                        | 5    | 43,2          | 5,0           | 1760        |               |
| 15                        | 6    | 43,2          | 5,0           | 3334        |               |
| 15                        | 7    | 43,2          | 5,0           | 1275        |               |
| 15                        | 8    | 43,2          | 5,0           | 683         |               |
| 15                        | 13   | 38,0          | 5,0           | 501159      |               |
| 15                        | 14   | 38,0          | 5,0           | 177598      |               |
| 15                        | 15   | 38,0          | 5,0           | 89112       |               |
| 15                        | 16   | 38,0          | 5,0           | 598350      |               |
| 30                        | 9    | 18,1          | 5,0           | 556083      | 53,2          |
| 30                        | 10   | 20,0          | 5,0           | 811575      | 50,4          |
| 30                        | 15   | 20,0          | 5,0           | 2000000     |               |
| 30                        | 16   | 20,0          | 5,0           | 1665500     | 57,5          |
| 30                        | 19   | 20,0          | 5,0           | 3168802     | 58,5          |
| 30                        | 20   | 17,0          | 5,0           | 2000000     |               |
| 30                        | 21   | 30,0          | 5,0           | 1212633     |               |
| 30                        | 23   | 30,0          | 5,0           | 340069      | 74,52         |
| 30                        | 24   | 30,0          | 5,0           | 1058451     |               |
| 30                        | 25   | 30,0          | 5,0           | 240000      |               |
| 30                        | 28   | 35,0          | 5,0           | 2000000     |               |
| 30                        | 29   | 38,0          | 5,0           | 541678      |               |
| 30                        | 30   | 38,0          | 5,0           | 121426      |               |
| 60                        | 8    | 38,0          | 5,0           | 2000000     | 79,9          |
| 60                        | 9    | 50,0          | 5,0           | 257         |               |
| 60                        | 12   | 38,0          | 5,0           | 13875       |               |
| 60                        | 15   | 38,0          | 5,0           | 16118       |               |
| 60                        | 16   | 38,0          | 5,0           | 91573       |               |
| 60                        | 21   | 38,0          | 5,0           | 105578      |               |
| 60                        | 22   | 38,0          | 5,0           | 308948      |               |
| 60                        | 17   | 38,0          | 5,0           | 5400        |               |
| 60                        | 20   | 38,0          | 5,0           | 5938        |               |



Tab. A4: Ergebnisse der dynamischen Zugversuche (Klebstoff B)

| Fugen-<br>winkel $\alpha$ | Bez. | $F^0$<br>[kN] | $F^u$<br>[kN] | Lastwechsel | $F_r$<br>[kN ] |
|---------------------------|------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 60                        | 29   | 60,0          | 5,0           | 9497        |                |
| 60                        | 30   | 60,0          | 5,0           | 2277        |                |
| 60                        | 31   | 60,0          | 5,0           | 25054       |                |
| 60                        | 32   | 60,0          | 5,0           | 23900       |                |

AUSWERTUNG DER DYNAMISCHEN ZUGVERSUCHE MIT HILFE DER ARCSIN/ $\sqrt{P}$  - TRANSFORMATION

a) Zeitfestigkeitsbereich

$$p_i = \frac{i}{n}$$

mit  $n$  = Anzahl der Versuche je Stufe

für  $i = n$  wird

$$p_i = 1 + \frac{1}{2n}$$

Stufe 1  $F^0 = 43,2 \text{ kN}$

| i    | $N_i \cdot 10^3$ | $\log N_i$ | $p_i$ | $\arcsin \sqrt{p_i}$ |
|------|------------------|------------|-------|----------------------|
| 1,00 | 0,683            | -0,165579  | 0,25  | 0,523599             |
| 2,00 | 1,275            | 0,105510   | 0,50  | 0,785398             |
| 3,00 | 1,760            | 0,245513   | 0,75  | 1,047198             |
| 4,00 | 3,334            | 0,522966   | 0,88  | 1,217055             |

Stufe 2  $F^0 = 38,0 \text{ kN}$

| i     | $N_i \cdot 10^3$ | $\log N_i$ | $p_i$ | $\arcsin \sqrt{p_i}$ |
|-------|------------------|------------|-------|----------------------|
| 1,00  | 13,875           | 1,142233   | 0,07  | 0,270550             |
| 2,00  | 16,118           | 1,207311   | 0,14  | 0,387597             |
| 3,00  | 89,112           | 1,949936   | 0,21  | 0,481275             |
| 4,00  | 91,573           | 1,961767   | 0,29  | 0,563943             |
| 5,00  | 105,578          | 2,023573   | 0,36  | 0,640522             |
| 6,00  | 121,426          | 2,084312   | 0,43  | 0,713724             |
| 7,00  | 177,598          | 2,249438   | 0,50  | 0,785398             |
| 8,00  | 241,196          | 2,382370   | 0,57  | 0,857072             |
| 9,00  | 308,948          | 2,489885   | 0,64  | 0,930274             |
| 10,00 | 416,829          | 2,619958   | 0,71  | 1,006854             |
| 11,00 | 460,351          | 2,663089   | 0,79  | 1,089521             |
| 12,00 | 501,159          | 2,699976   | 0,86  | 1,183200             |
| 13,00 | 541,678          | 2,733741   | 0,93  | 1,300247             |
| 14,00 | 598,350          | 2,776955   | 0,96  | 1,369438             |

Stufe 3  $F^0 = 30,0 \text{ kN}$

| i    | $N_i \cdot 10^3$ | $\log N_i$ | $p_i$ | $\arcsin \sqrt{p_i}$ |
|------|------------------|------------|-------|----------------------|
| 1,00 | 16,104           | 1,206934   | 0,13  | 0,361367             |
| 2,00 | 23,530           | 1,371622   | 0,25  | 0,523599             |
| 3,00 | 27,359           | 1,437100   | 0,37  | 0,659058             |
| 4,00 | 240,000          | 2,380211   | 0,50  | 0,785398             |
| 5,00 | 340,069          | 2,531567   | 0,63  | 0,911738             |
| 6,00 | 672.993          | 2,828011   | 0,75  | 1,047198             |
| 7,00 | 1058,451         | 3,024671   | 0,88  | 1,209429             |
| 8,00 | 1212,633         | 3,083729   | 0,94  | 1,323329             |

Stufe 4  $F^0 = 20,0 \text{ kN}$

| i    | $N_i \cdot 10^3$ | $\log N_i$ | $p_i$ | $\arcsin \sqrt{p_i}$ |
|------|------------------|------------|-------|----------------------|
| 1,00 | 556,083 *)       | 2,745140   | 0,20  | 0,463648             |
| 2,00 | 811,575          | 2,909329   | 0,40  | 0,684719             |
| 3,00 | 1665,500 *)      | 3,221545   | 0,60  | 0,886077             |
| 4,00 | 2000,000 *)      | 3,301030   | 0,80  | 1,107149             |
| 5,00 | 3168,802         | 3,500895   | 0,90  | 1,249046             |

\*) als Bruch gewertet

Die lineare Regressionsrechnung zwischen  $\log N_i$  und  $\arcsin \sqrt{p_i}$  ergibt:

Stufe 1:  $\log N = 0,9281 \cdot \arcsin \sqrt{p_i} - 0,6520$

Stufe 2:  $\log N = 1,4640 \cdot \arcsin \sqrt{p_i} + 1,0023$

Stufe 3:  $\log N = 2,2360 \cdot \arcsin \sqrt{p_i} + 0,3266$

Stufe 4:  $\log N = 0,9508 \cdot \arcsin \sqrt{p_i} + 2,3006$

(s. Bild A1 bis A4)

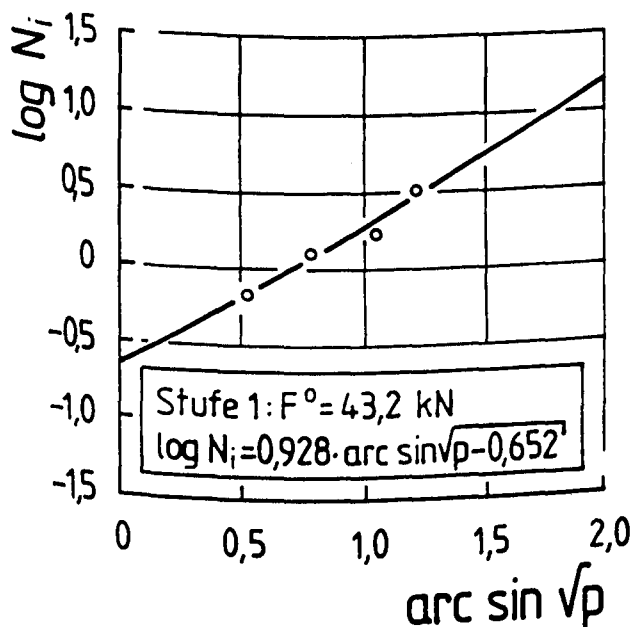


Bild A1

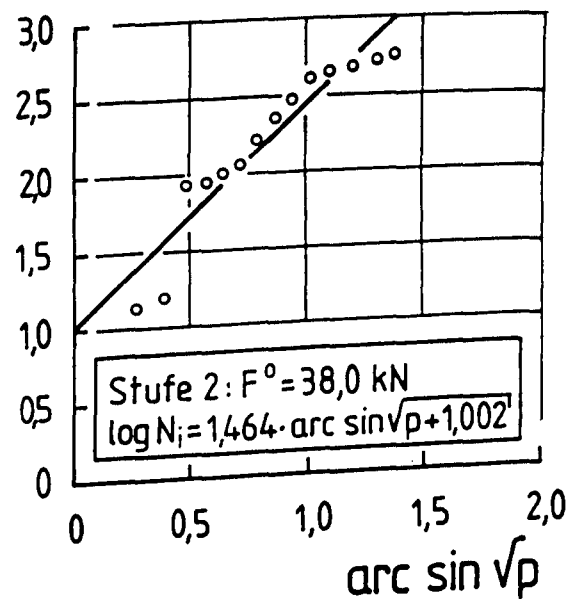


Bild A2

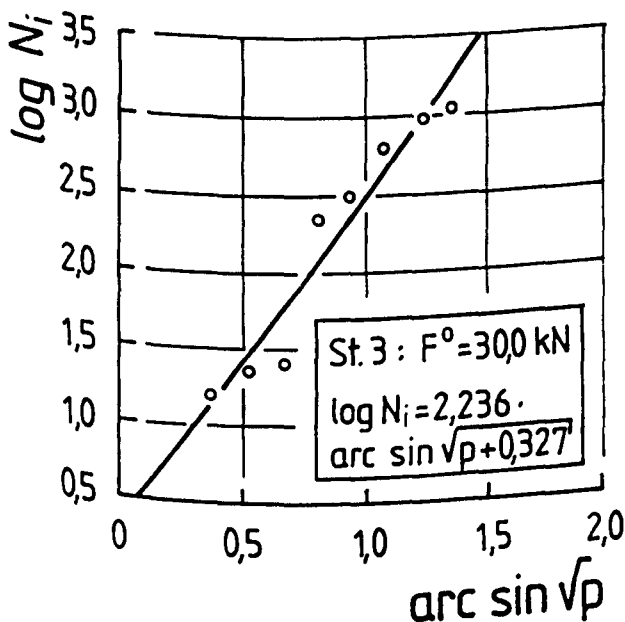


Bild A3

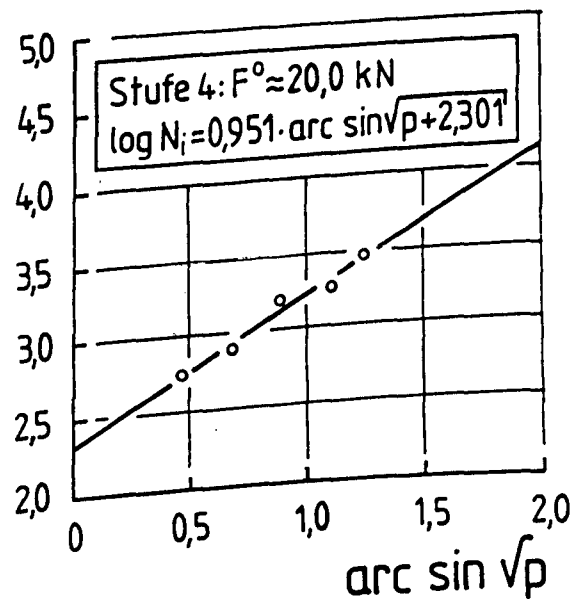


Bild A4

Die Schätzwerte der Bruchlastspielzahlen betragen

| Stufe | $N_{(p=0\%)} \cdot 10^3$ | $N_{(p=5\%)} \cdot 10^3$ | $N_{(p=50\%)} \cdot 10^3$ | $N_{(p=95\%)} \cdot 10^3$ |
|-------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 1     | 0,22                     | 0,36                     | 1,19                      | 3,95                      |
| 2     | 10,05                    | 21,5                     | 141,93                    | 936,97                    |
| 3     | 2,12                     | 6,77                     | 121,0                     | 2161,0                    |
| 4     | 199,81                   | 327,38                   | 1115,3                    | 3799,5                    |

b) Überlebensbereich

$$p_i = \frac{r}{n}$$

mit  $r$  = Anzahl der Brüche je Stufe

$n$  = Anzahl der Versuche je Stufe

| Stufe | $F^0$ | $r$ | $n$ | $p_i$ | $\arcsin \sqrt{p_i}$ |
|-------|-------|-----|-----|-------|----------------------|
| 1     | 43,2  | 4   | 4   | 1,0   | 1,571                |
| 2     | 38,0  | 14  | 16  | 0,875 | 1,209                |
| 3     | 30,0  | 8   | 10  | 0,800 | 1,107                |
| 4     | 20,0  | 2   | 7   | 0,286 | 0,564                |

Die lineare Regressionsrechnung zwischen  $F^0$  und  $\arcsin \sqrt{p_i}$  führt zu

$$F^0 = 23,67 \cdot \arcsin \sqrt{p_i} + 6,47$$

(s. Bild A5)

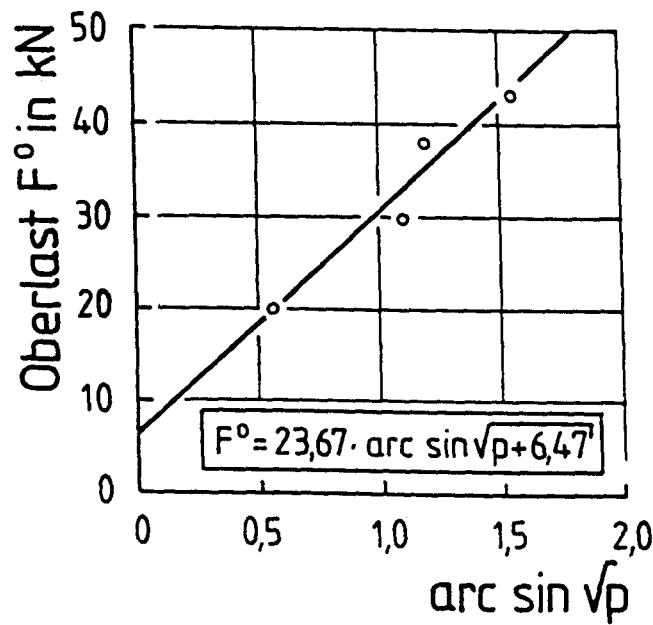


Bild A5

Die Schätzwerte der Oberlast für  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastwechsel betragen

|               |            |
|---------------|------------|
| $F^0_{0\%}$   | = 6,47 kN  |
| $F^0_{5\%}$   | = 11,81 kN |
| $F^0_{50\%}$  | = 25,06 kN |
| $F^0_{95\%}$  | = 38,31 kN |
| $F^0_{100\%}$ | = 43,65 kN |

Tab. A6: Ergebnisse der dynamischen Druckversuche (Klebstoff A)

| Fugen-<br>winkel $\alpha$ | Bez. | $F^0$<br>[kN] | $F^u$<br>[kN] | Lastwechsel    | $F_r$<br>[kN] |
|---------------------------|------|---------------|---------------|----------------|---------------|
| 60                        | 33   | -122,0        | -5,0          | 146412         |               |
| 30                        | 33   | -68,0         | -5,0          | $2 \cdot 10^6$ | -219,6        |
| 30                        | 34   | -68,0         | -5,0          | $2 \cdot 10^6$ | -231,1        |
| 30                        | 35   | -68,0         | -5,0          | $2 \cdot 10^6$ | -244,4        |
| 30                        | 36   | -68,0         | -5,0          | $2 \cdot 10^6$ | -240,0        |
| 60                        | 37   | -68,0         | -5,0          | $2 \cdot 10^6$ | -237,6        |
| 60                        | 35   | -122,0        | -5,0          | 752689         |               |
| 60                        | 37   | -122,0        | -5,0          | 278698         |               |
| 60                        | 36   | -122,0        | -5,0          | 194712         |               |

